

Resum

El plantejament d'aquest Treball Fi de Grau consisteix en fer un estudi de diversos edificis emblemàtics situats en diferents continents del planeta des de dos angles del món de l'enginyeria.

El primer és l'anàlisi estructural (en concret des d'un anàlisi dinàmic modal) que és el que ocupa la major part del treball i l'altre és el fluidodinàmic de caràcter estàtic (l'aerodinàmica dels edificis).

L'anàlisi modal permet esbrinar, mitjançant càlculs computacionals, quines són les freqüències pròpies dels edificis a partir de models tridimensionals, per tal de després comparar-los amb fons bibliogràfiques. Aquest és d'interès perquè l'efecte de la ressonància que es pot produir amb aquestes freqüències pot produir que l'edifici tingui moviments de risc per l'estabilitat de la mateixa.

Per altra banda l'anàlisi aerodinàmic computacional és una manera paral·lela d'estudiar els efectes del vent sobre els edificis tal com s'ha fet i es segueix fent històricament amb els estudis mitjançant túnels de vent. A partir d'aquí, es pot deduir si tenen un bon o no tan bon comportament aerodinàmic al llarg de l'estructura.

Per tal de poder realitzar aquests anàlisis s'ha emprat el programari Ansys Workbench de l'Escola d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Primer he hagut d'aprendre'l a utilitzar pel primer dels anàlisis i recordar com funcionava pel cas de l'aerodinàmic, en que ja hi havia treballat mentre cursava l'assignatura optativa d'Aerodinàmica de Q8.

L'objectiu principal del treball és aprendre a utilitzar l'Ansys i saber caracteritzar els modes propis d'una estructura modelada a partir de SolidWorks per tal de poder entendre com es fan aquests anàlisis en la vida real, així com saber interpretar com es comportarà algun dels edificis a nivell estacionari en un anàlisi aerodinàmic.

S'ha pogut realitzar un estudi complert dels modes vibratoris de tres edificis singulars i l'aerodinàmic per parts de l'edifici principal d'estudi.

Sumari

El següent sumari es genera i s'actualitza automàticament amb l'opció “*actualizar campos*” que surt quan es prem el botó dret del ratolí a sobre d'ell.

RESUM	1
SUMARI	2
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte	7
2.2. Motivació	7
2.3. Requeriments previs	7
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte	10
4. EDIFICIS ESTUDIATS	12
4.1. CN Tower de Toronto	12
4.1.1. Descripció	12
4.1.2. Descripció	12
4.2. Hotel Vela de Barcelona	15
4.2.1. Descripció	15
1.1.1. Elaboració del model en Solidworks	17
4.3. Shanghai World Financial Center	20
4.3.1. Descripció	20
1.1.1. Elaboració del model en SolidWorks	21
5. INTRODUCCIÓ A L'ANÀLISI MODAL I AERODINÀMIC	24
5.1. Anàlisi modal en la dinàmica estructural	24
5.1.1. Sistema senzill	24
5.1.2. Ressonància	31
5.1.3. Sistemes complexos	35
5.1.4. Anàlisi modal a nivell experimental	38
5.2. Conceptes bàsics d'aerodinàmica	40
5.3. Anàlisi aerodinàmic estàtic	42
5.3.1. Efecte del vent	42

5.3.2. Millores aerodinàmiques dels edificis	44
6. ANÀLISIS MODALS	45
6.1. Anàlisi modal de la CN Tower de Toronto en Ansys Modal	45
6.1.1. Consideracions prèvies: materials	45
6.1.2. Geometria i Mallat.....	50
6.1.2.1. Geometria	50
6.1.2.2. Mallat.....	52
6.1.2.3. Anàlisi de sensibilitat de la malla.....	54
6.1.3. Resultats de les dues hipòtesis	59
6.1.3.1. Hipòtesi tres materials.....	59
6.1.3.2. Hipòtesi dos materials.....	59
6.1.3.3. Comparativa amb la literatura	61
6.1.4. Modes de vibració.....	64
6.1.4.1. Vistes	64
6.1.4.2. Descripció dels modes propis pel cas de 2 materials diferents	65
6.1.4.3. Taula resum dels diferents modes.....	74
6.2. Anàlisi modal de L'Hotel Vela de Barcelona en Ansys Modal	80
6.2.1. Consideracions prèvies: materials	80
6.2.2. Geometria i Mallat.....	81
6.2.2.1. Geometria	81
6.2.2.2. Mallat.....	81
6.2.2.3. Anàlisi de sensibilitat de la malla.....	82
6.2.3. Resultats.....	84
6.2.4. Modes de vibració.....	85
6.2.4.1. Taula Resum.....	85
6.3. Anàlisi modal de la torre Shanghai World Financial Center (SWFC) en Ansys Modal.....	87
6.3.1. Consideracions prèvies: materials	87
6.3.2. Geometria i Mallat.....	87
6.3.2.1. Geometria	87
6.3.2.2. Mallat.....	88
6.3.2.3. Anàlisi de sensibilitat de la malla.....	89
6.3.3. Resultats.....	91

6.3.3.1. Comparativa amb la literatura	92
6.3.4. Modes de vibració.....	96
6.3.4.1. Eixos de coordenades	96
6.3.4.2. Taula Resum.....	96
6.4. Anàlisi modal i despreniment de vòrtex.....	104
7. ANÀLISI AERODINÀMIC	105
7.1. Anàlisi aerodinàmic de la CN Tower de Toronto.....	105
7.1.1. Consideracions prèvies	105
7.1.2. Simulació de la base i el mirador	108
7.1.2.1. Geometria	108
7.1.2.2. Mallat.....	110
7.1.2.3. Setup.....	114
7.1.2.4. Resultats	115
7.1.2.4.1..... C_D , residus i F_D	115
7.1.2.4.2..... Velocitats	119
7.1.2.4.3..... Pressions	121
7.1.3. Simulació de les antenes	123
7.1.3.1. Geometria	123
7.1.3.2. Mallat.....	123
7.1.3.3. Resultats	124
7.1.3.3.1..... C_D , residus i F_D	124
7.1.3.3.2..... Velocitats	126
7.1.3.3.3..... Pressions	127
CONCLUSIONS	129
BIBLIOGRAFIA.....	131
Referències bibliogràfiques.....	131
Bibliografia complementària.....	132
ANNEX	133

1. Glossari

CNT: Canadian National Tower

SWFC: Shanghai World Financial Center

CFD: Computational Fluid Dynamics

MEF: Mètode dels elements finits

Cd: coeficient de drag

Fd: Força de drag

HSLA: High Strength Low Allow Steel

2. Prefaci

A l'hora de projectar una edificació a nivell d'enginyeria hi ha dos aspectes molt importants a destacar, que són l'anàlisi modal i l'aerodinàmic. El primer permet detectar situacions de risc en que l'estructura pot entrar en ressonància per mitjà de l'anàlisi de les seves freqüències pròpies, que es pot calcular computacionalment. L'anàlisi aerodinàmic és d'interès en edificacions d'alçada ja que normalment a més alçada les formes dels mateixos tendeixen a ser més esveltes i per tant més sensibles a les càrregues laterals del vent i, d'altra banda, les diferents possibles formes dels mateixos els hi confereixen una resposta aerodinàmica diversa, que fa que la incidència del mateix flux d'aire pugui ser més o menys important.

2.1. Origen del projecte

L'origen del projecte ha estat l'interès per les assignatures de Mecànica de Fluids durant el grau, en especial la segona part de la mateixa, que al seu torn em va portar a escollir l'assignatura optativa d'Aerodinàmica i fer un treball en grup sobre l'edifici Vela de Barcelona. Per altra banda, sempre he tingut interès en el món de les estructures i els edificis i preguntar-me què es pot estudiar d'ells a nivell enginyeril.

2.2. Motivació

La motivació d'aquest treball és poder fer deduccions a partir dels coneixements apresos en l'assignatura d'Aerodinàmica de manera semblant a la que ja vaig fer en el treball de curs, així com contrastar amb fonts bibliogràfiques valors d'anàlisi modal obtinguts amb el software d'Ansys, intentant trobar la millor aproximació possible dels edificis fent-ne estimacions oportunes sobre els seus materials partint de zero respecte la seva modelització.

2.3. Requeriments previs

Per tal de redactar el treball s'ha hagut d'aprendre a utilitzar el software d'Ansys Workbench de l'Escola d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Per altra banda, entendre conceptes sobre

l'anàlisi modal i refrescar els coneixements de SolidWorks de primer de carrera.

3. Introducció

Quan es projecta un edifici a l'actualitat cal tenir en compte les freqüències pròpies del mateix ja que si una excitació externa coincideix amb algun d'aquests valors (ressonància) la vibració pròpia en alguna d'aquestes freqüències augmentarà fent que es puguin produir fractures en algunes parts del mateix.

Per altra banda, els enginyers i arquitectes també tenen en compte la forma a l'hora de dissenyar els edificis doncs aquesta determina un comportament aerodinàmic millor o pitjor.

3.1. Objectius del projecte

Aquest projecte té com a objectiu estudiar tres edificis de característiques diferents. En concret els objectius són, d'una banda, fer-ne el seu anàlisi modal, trobant les seves freqüències pròpies, entendre els seus modes i després ser comparades amb la literatura. Aquesta és la part principal d'aquest Treball. Per l'altra, fer un breu estudi aerodinàmic a nivell estacionari d'algun dels edificis, centrant-se en el coeficient de drag, l'observació dels vectors velocitat, la distribució de pressions i fenòmens com el deixant, per treu-re'n conclusions sobre la seva aerodinàmica. Finalment, l'altre objectiu del projecte és aprendre a utilitzar Ansys Modal i Fluent.

Per tal de fer-ho possible, després d'aquesta introducció es presenten els capítols que són el cos del treball. La seva estructuració és la següent:

En el quart capítol, s'introduiran les característiques bàsiques dels edificis estudiats, així com la seva obtenció tridimensional si s'escau. Els edificis són la CN Tower de Toronto (Canadian National Tower), l'Hotel W de Barcelona, conegut popularment com a Hotel Vela, i el Shanghai World Financial Center, d'ara endavant també s'anomenarà pel seu acrònim, SWFC.

Al llarg del cinquè capítol es farà una explicació de l'anàlisi modal i aerodinàmic, així com dels conceptes més destacats a tenir en compte. Al capítol sisè d'aquest treball es farà l'anàlisi modal dels diferents edificis i en el setè l'anàlisi aerodinàmic. Al llarg d'aquests capítols s'introduiran a mode de guia també com s'obtenen els diferents resultats amb el programari d'Ansys Workbench.

3.2. Abast del projecte

L'abast del projecte ve principalment determinat pel software utilitzat i el nivell de precisió al que es pot arribar en els resultats el condiciona la bibliografia.

Per una banda, per tal de realitzar els models tridimensionals dels edificis s'ha utilitzat SolidWorks i SketchUp. La web d'SketchUp té un apartat anomenat "warehouse" on es poden cercar gratuïtament projectes realitzats per altres persones disponibles al públic per la seva visualització. Tot i així, aquests formats en SketchUp rarament es poden exportar satisfactòriament a SolidWorks ja que, malgrat hi ha una extensió d'SketchUp que ho permet fer, a l'hora de fer-ne la reconstrucció amb SolidWorks els models passen a tenir un format en forma de capes enlloc de ser un sòlid compacte. Es va intentar provar-ho tant amb la Torre de Toronto com amb el Shanghai World Financial Center però, efectivament, no es va poder fer una exportació de formats que reconstruís bé els edificis per al seu estudi. Un cop obtinguts els models en SolidWorks, d'aquí es poden exportar sense cap problema al format "iges" que és amb el que treballa Ansys Workbench.

En el cas de la CN Tower de Toronto s'ha fet un modelat partint de zero amb SolidWorks a partir de diverses fonts: fotografies, plànol a escala general de la torre d'una web i de l'SkyPod, així com un model en SketchUp molt aproximat on es podien fer mesures en sistema americà, que s'utilitzava com a guia pels petits detalls.

Per l'Hotel Vela de Barcelona ja es partia d'un model en SolidWorks realitzat en un treball grupal de l'assignatura d'Aerodinàmica, el qual es va realitzar a partir dels plànols d'un llibre.

Pel Shanghai World Financial Center no s'ha pogut trobar un model en format iges per Internet que només inclogués l'edifici (incloïa part de la base com un conjunt) així que s'ha procedit a fer-ne el disseny en Solidworks per tal de després exportar el model al format *iges* per a Ansys Workbench. El model s'ha realitzat a partir de distàncies oficials de l'estudi d'arquitectura i de la web de l'edifici, així com models en Sketchup.

Pel que fa a l'anàlisi modal de la CN Tower ha calgut fer estimacions dels materials utilitzats. Per fer-ho, s'ha utilitzat bibliografia d'Internet tant en format web com audiovisual. Com que es tenia bibliografia de les freqüències pròpies de la torre, s'ha acabat ajustant els materials amb aquestes referències. Després el valor del formigó armat ha servit de guia pels altres edificis.

S'han fet estudis de sensibilitat de malla amb un límit que donés valors poc diferents, considerant que el temps computacional és molt elevat en aquest tipus d'estudi.

Pel que fa a l'anàlisi aerodinàmic l'abast és el propi d'un estudi en temps estacionari de l'assignatura d'Aerodinàmica de Q8.

4. EDIFICIS ESTUDIATS

4.1. CN Tower de Toronto

4.1.1. Descripció

La construcció de la CN Tower de Toronto va ser tota una fita de l'enginyeria amb la seva alçada de 553,3 metres, convertint-se en l'edifici més alt del món el 1974 i ostentant el títol fins l'any 2007 quan es va construir el Burj Khalifa. Continua sent visitada anualment per 1,5 milions de persones. [1]

La funció principal de la torre és servir de mirador i restaurant a nivell social, però a més compleix la funció d'emetre el senyal de més de 30 canals de televisió i ràdio a tot Ontario, al Canadà, i telefonía mòbil.

Els punts principals són:

- Terrassa de terra de vidre a 342 metres d'alçada.
- LookOutLevel (primer mirador) a 346 metres.
- Restaurant giratori a 351 metres. Fins aquí són els tres pisos del que anomenarem mirador a partir d'ara, que té forma cilíndrica.
- Edge Walk per caminar per la vora exterior de la torre: 356 metres.
- SkyPod (mirador més alt de tots prop de l'antena) a 447metres.

4.1.2. Descripció

La primera idea de l'elaboració del model és reproduir el plànol de la planta de la que es disposa [2] el més fidedignament possible. A partir d'aquí, la millor manera de anar reduint la secció de la planta en forma de "Y" és fer altres croquis iguals que els de la planta però d'arestes més curtes a dues alçades diferents, una a meitat de l'alçada de la base i l'altre a 332 metres, que és on comença el mirador (veure figura 4.1.2.1). Un cop es tenen els tres croquis a plànols d'alçades diferents, es procedeix a fer una operació de recubrir intentant seguir la corba del plànol en alçat

del que es disposa [3] (es va calcar a la pantalla de l'ordinador utilitzant un focus de llum).

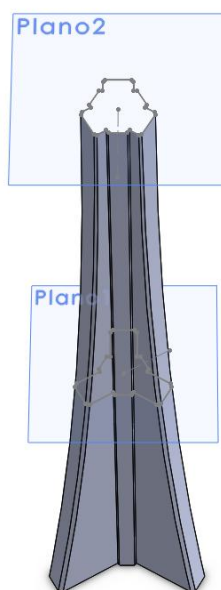


Figura 4.1.2.1. Part de recubrir entitats

Després es procedeix a fer el mirador, amb els seus tres pisos fent un croquis tal que després es revolucionarà (figura 4.1.2.2). Es disposa de les mides pràcticament exactes d'aquest gràcies a una imatge d'Internet en tall intern [4].

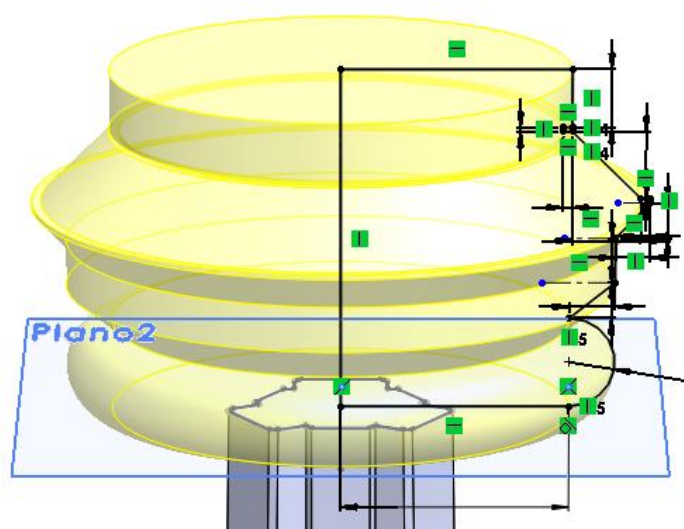


Figura 4.1.2.3. Revolució del mirador

Tot seguit s'extreuix la base de formigó on anirà el mirador de dalt de tot i l'antena així com els elements que el connecten amb la base de baix (figura 4.1.2.3.).

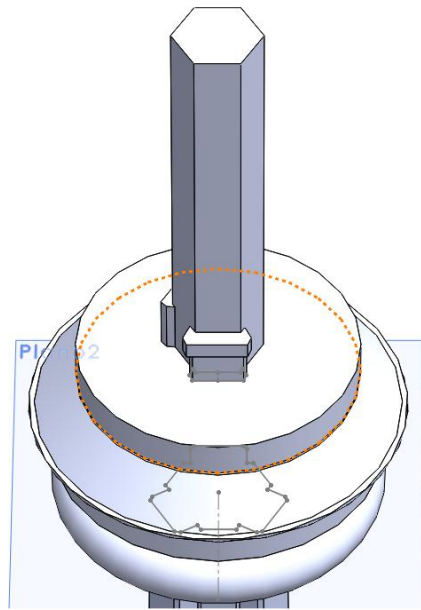


Figura 4.1.2.3. Extrusions

Finalment es fa el croquis del mirador més alt de tots i es fan revolucions–tall dels pisos interiors dels miradors al voltant del nucli de formigó per on la gent admira les vistes.

Finalment, en un projecte de solidworks a part, es fa un croquis revolució de les antenes (cal que sigui apart perquè solidworks no admet alçades tan elevades, igual que l'Ansys si no se li activa una opció de Large Support Model On).

4.2. Hotel Vela de Barcelona

4.2.1. Descripció

L'Hotel Vela, situat en front la línia costera de Barcelona, està format per tres edificis: la Torre Vela, el Pòdium i l'Atrium (veure figura 4.2.1.1). La seva superfície és de 47000 m² [5].

El Pòdium només té dos nivells de cimentació i és on hi ha les sales comunes com ara l'entrada, restaurants, etc. L'Atrium és un edifici en forma de paral·lelepípede de 35 metres d'alt per 40 d'amplada, amb un total de 7 plantes (6 d'habitacions i una de zona pública). La Torre té forma de Vela i el primer pis és d'accés públic. En total té 26 plantes (una d'accés públic, 24 d'habitacions i el bar de l'àtic) més la sala de màquines (veure figura 4.2.1.3).

Al nivell de les plantes 18, 19 i 20 hi ha un voladís que s'usa com a Terrassa, trencant la curvatura en forma de vela de la banda lateral. Finalment, en la seva cara posterior, en la darrera planta d'habitacions hi ha un seguit d'elements sortints en forma de grapa (figura 4.2.1.1). El logotip amb la lletra "W" (el seu nom real és hotel W) es va obviar per la seva modelització en Solidworks quan es va fer l'anàlisi aerodinàmic a l'assignatura d'Aerodinàmica i ara per l'anàlisi modal també s'ha omès, i la terrassa també s'ha simplificat (figura 4.2.1.2).

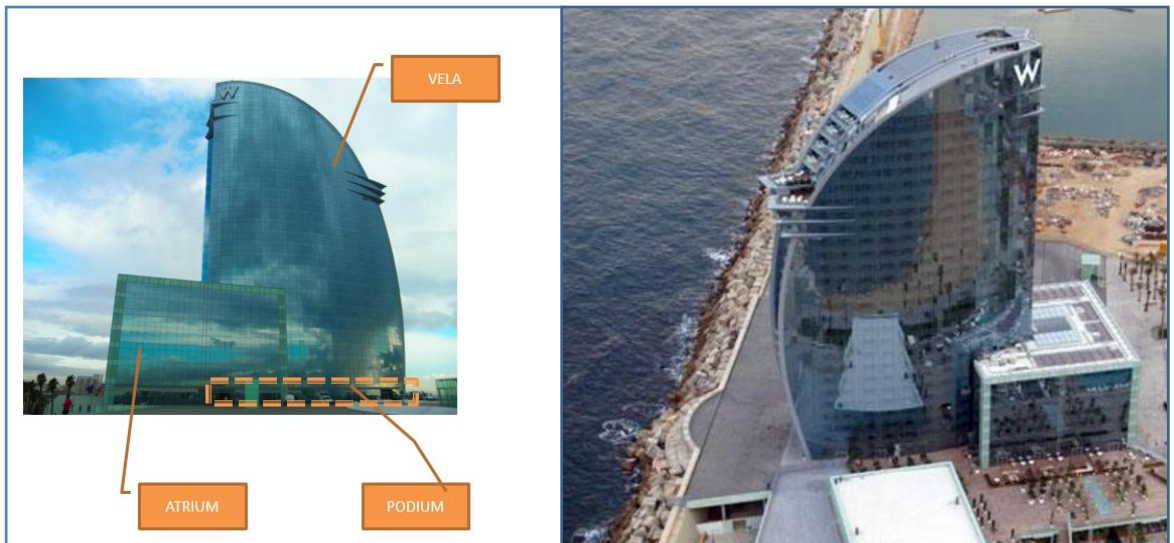


Figura 4.2.1.1. Parts de l'hotel

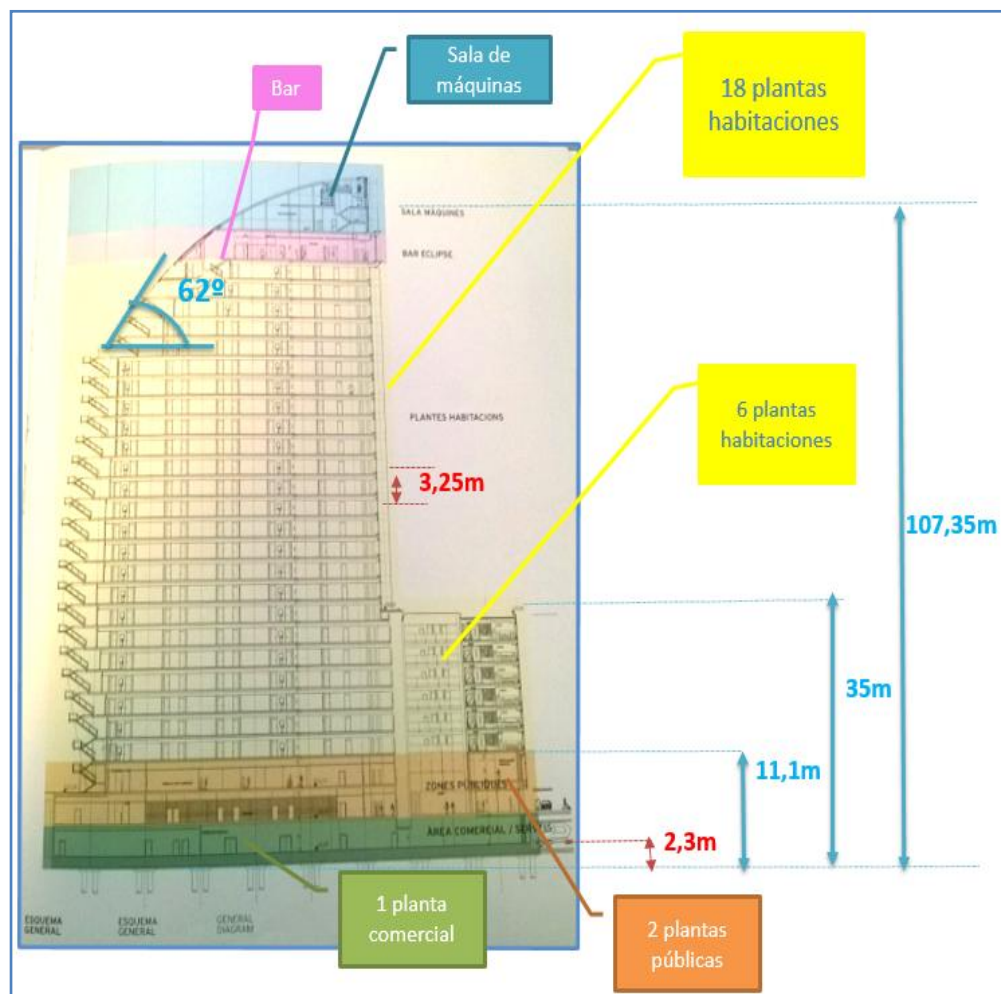


Figura 4.2.1.3. Mesures principals i subdivisions

Les plantes de la torre Vela tenen forma d'elipse o d'ull, amb els dos extrems truncats per talls oblics. Des del pis 1 fins al 10 les plantes augmenten lleugerament de longitud mentre que des del pis 10 fins al terrat es van reduint de mica en mica per fer la forma de vela.

A continuació es mostra una planta tipus de la Torre així com una planta tipus de la zona on coexisteixen el Vela i l'Atrium (figures 4.2.1.4).

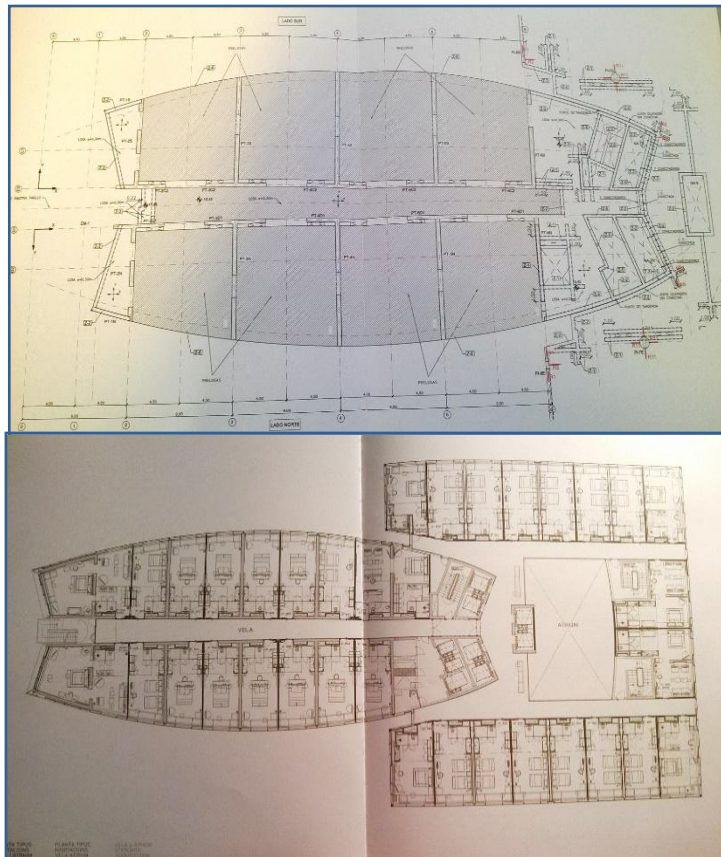


Figura 4.2.1.4 Plantes tipus

1.1.1. Elaboració del model en Solidworks

S'extreu la superfície a partir de la línia que defineix una planta en una de les cares corbes de l'hotel. Aquesta línia es crea a partir del pla real de l'edifici i se li donen cotes numèriques per obtenir un model similar al real (figura 4.2.2.1).

Després d'obtenir la paret curvada de l'hotel, es procedeix a arrodonir-la realitzant un croquis que es recolza sobre un pla de perfil obtingut de la bibliografia [5]. Es realitza un tall extruït del contorn tancat dibuixat en el croquis per eliminar material de la superfície corba no desitjada. (figura 4.2.2.2).

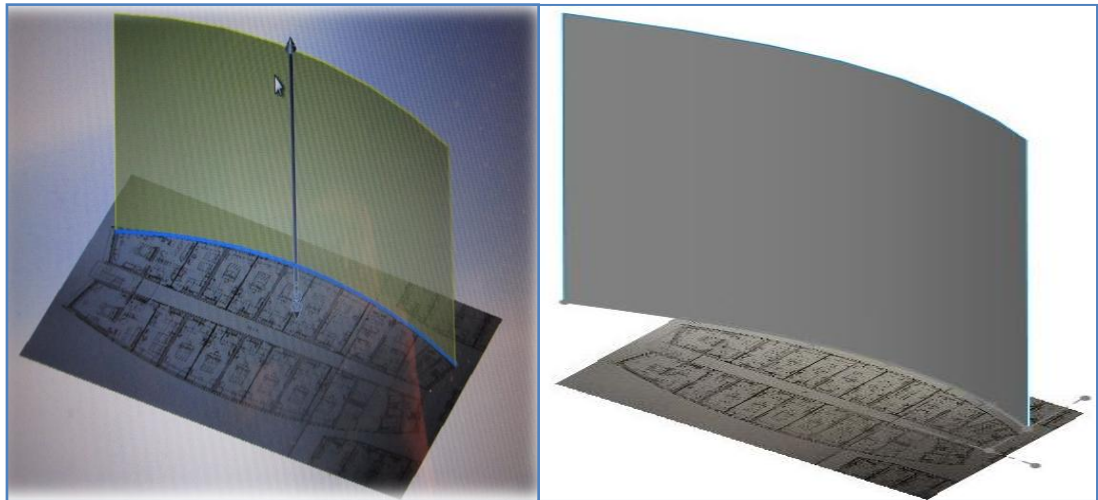


Figura 4.2.2.1. Extrusió de la cara lateral corba

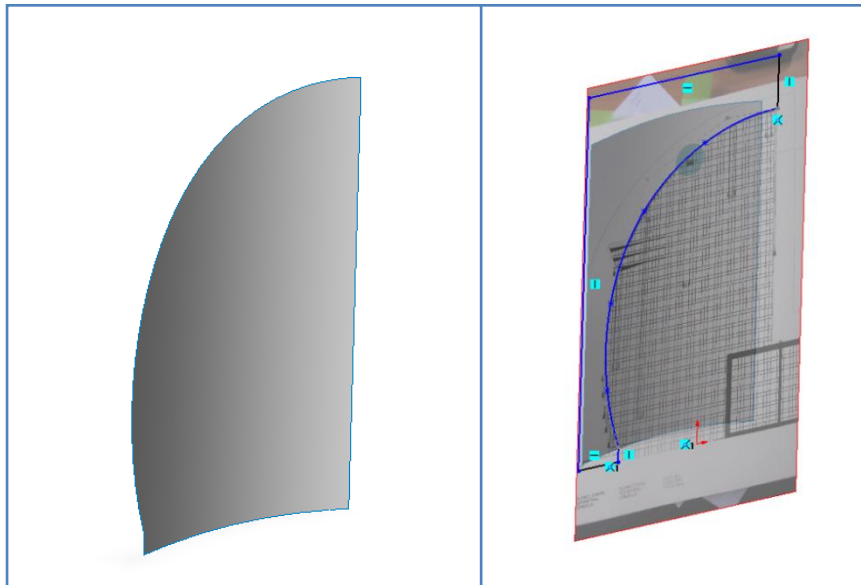


Figura 4.2.2.2. Modificació del contorn de la superfície corba

Després s'extrueixen dos línies més del pla en planta ja utilitzat. Una vegada obtinguda aquesta geometria es tanca per superfícies fins que tanqui un volum que s'omple de material per convertir-lo en una peça sòlida (4.2.2.3).

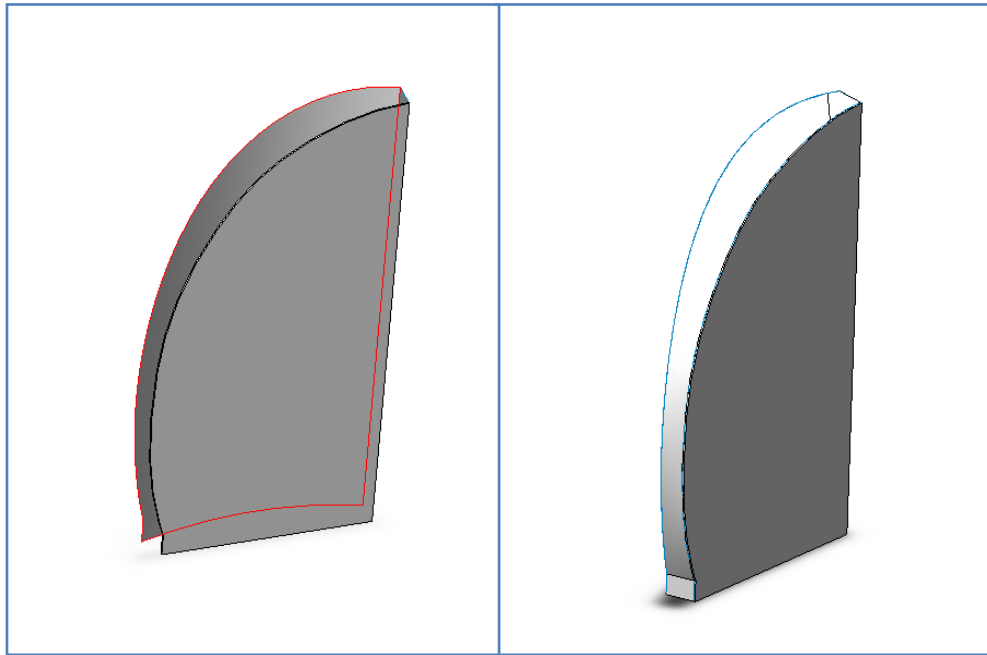


Figura 4.2.2.3. Generació de superfícies auxiliars per tancar un volum

Finalment se li afegiren la zona dels balcons frontals mitjançant operacions d'extrusió i extrusió-tall. Finalment s'aplica simetria al sòlid per duplicar-ho tot i obtenir l'hotel. A continuació es realitza la cavitat rectangular a la cara frontal i s'afegeixen els balcons centrals que es troben a tota l'alçada del cos (figura 4.2.2.4 i 4.2.2.5).

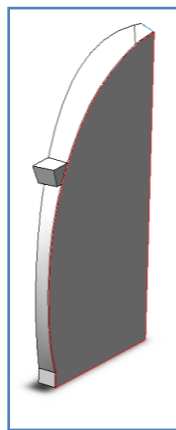


Figura 4.2.2.4. Primera meitat de l'hotel

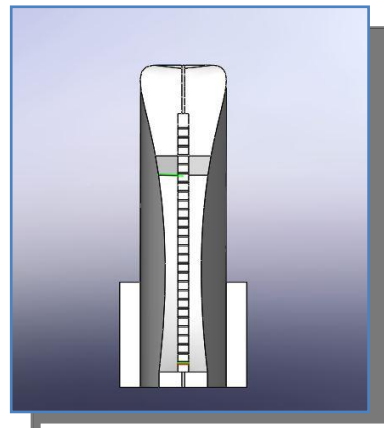


Figura 4.2.2.5. Alçat

EL model final es mostra a la figura 4.2.2.6.

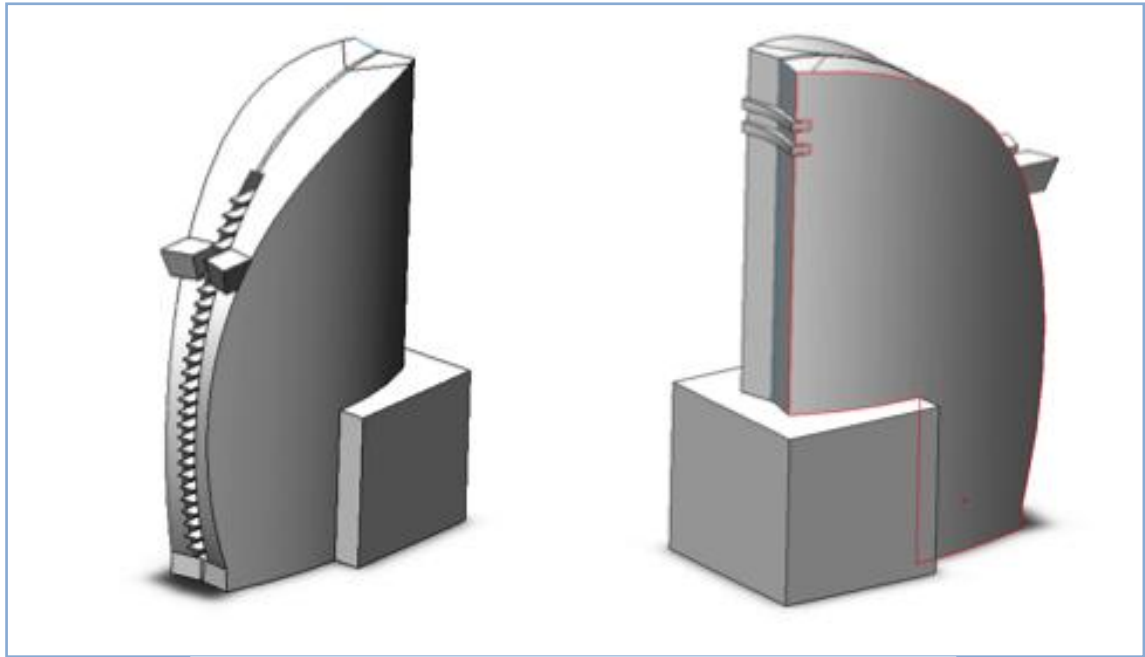


Figura 4.2.2.6. Model final

4.3. Shanghai World Financial Center

4.3.1. Descripció

És un edifici situat a a la ciutat de Shanghai, concretament al districte de Pudong, i es dedica a albergar oficines de temes de serveis financers i d'informació.

Als primers pisos té botigues i restaurants, i cap al pisos centrals té un centre cultural i oficines (70 pisos). Finalment, als pisos superiors té un Hotel Hyatt (14 pisos) i els tres darrers pisos (a la zona de l'obertura) són miradors. [6] (figura 4.3.1.1.)

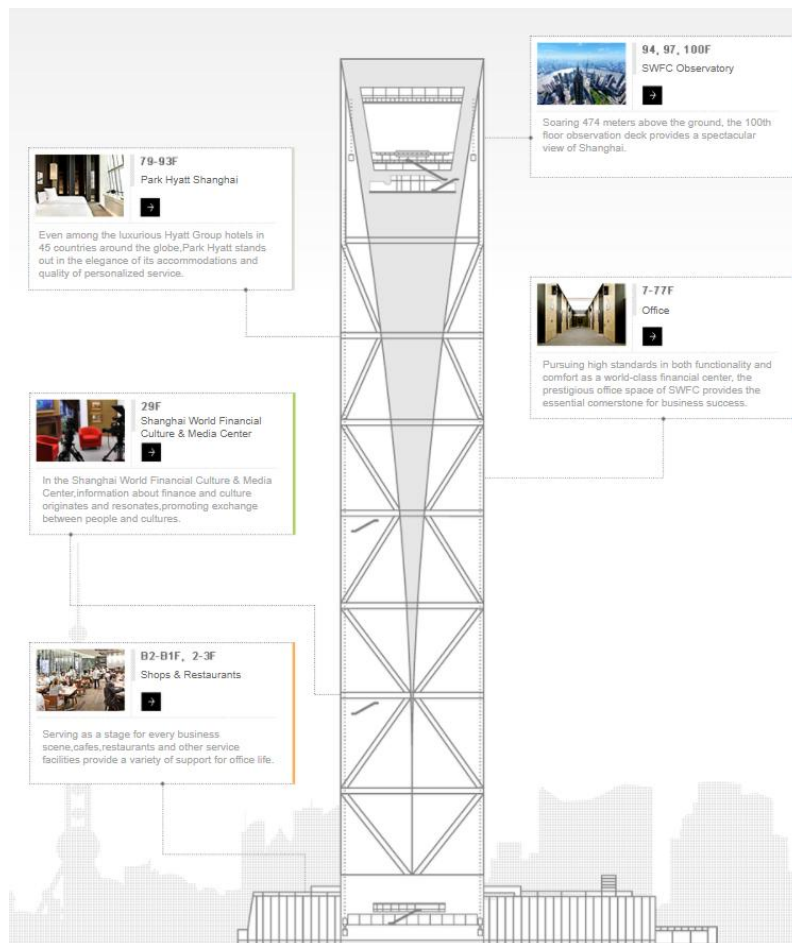


Figura 4.3.1.1 Parts de la torre SWFC

1.1.1. Elaboració del model en SolidWorks

Primerament es fa un gratacel prismàtic amb la base quadrada i s'extrueix fins als 493,4 metres d'alçada. A continuació des d'un dels plans del costat es procedeix a fer un croquis amb la línia corba característica visible del contorn del SWFC. Es fa un extruir Tall de la part que ha quedat emmarcada fora d'aquest contorn i d'aquesta manera s'obté, en les cares principals la forma desitjada (figura 4.3.2.1). Val a dir que trobar exactament la corba va ser bastant complicat doncs es va utilitzar el dibuix en alçat del que es disposava [3] per calcar el contorn corbat amb el full sobre la pantalla de l'ordinador i mentrestant resseguint la línia amb el ratolí, però era dificultós no només veure el que es dibuixava, sinó que qualsevol moviment del ratolí canviava l'escala de la torre en la pantalla i costava molt tornar a tenir el model amb la mida exacta que el dibuix del que es disposava. A més a més, solidworks no permet fer corbes tan obertes sense cometre error. Per tant, es van haver de fer molts intents anant comparant el resultat final per obtenir el més semblant als models en SketchUp en 3D dels que es disposava per comparar.

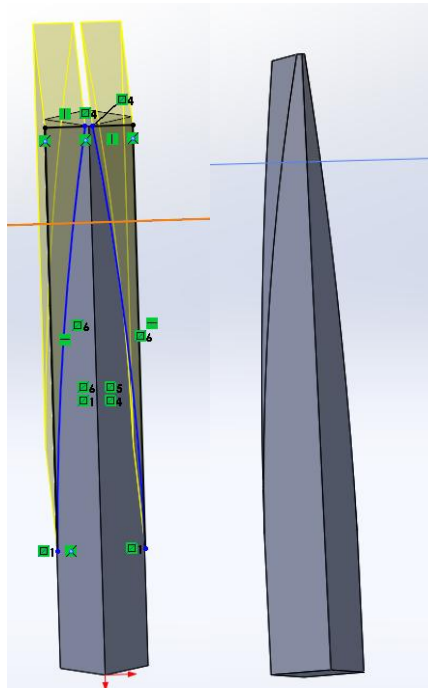


Figura 4.3.2.1. Extruir tall de sòlid sobrant i 1a. part del model

A continuació es tallen els costats i les orelles de dalt (figura 4.3.2.2)

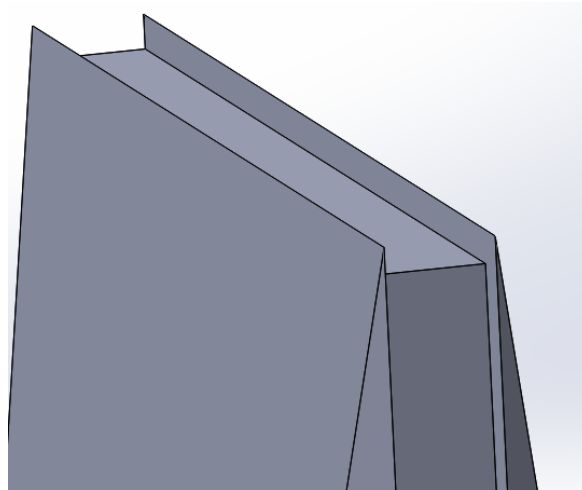


Figura 4.3.2.2. Talls externs

Es fa un croquis de l'obertura superior i es buida de la torre (figura 4.3.2.3)

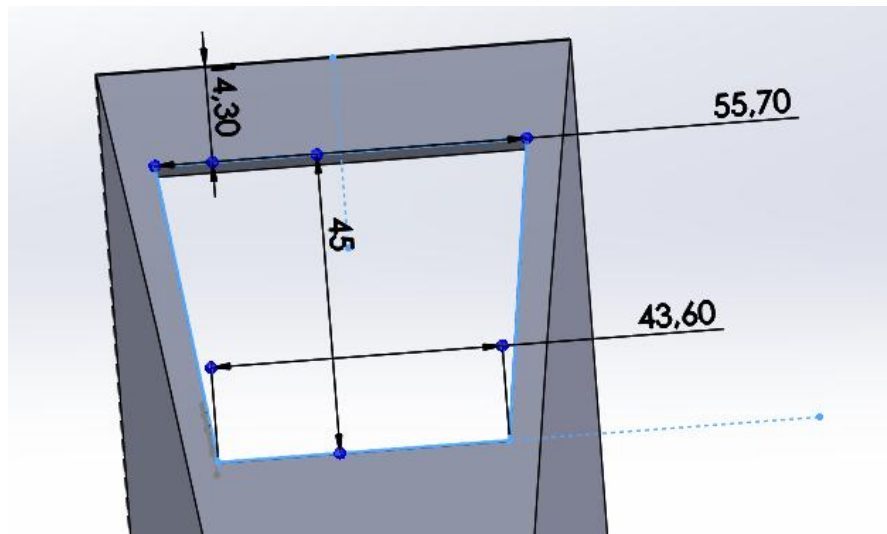


Figura 4.3.2.3. Tall de l'obertura superior

Finalment es creen els ponts que connecten les dues parts de l'edifici a través de l'obertura del mateix i es modelen unes columnes com en la foto [7].

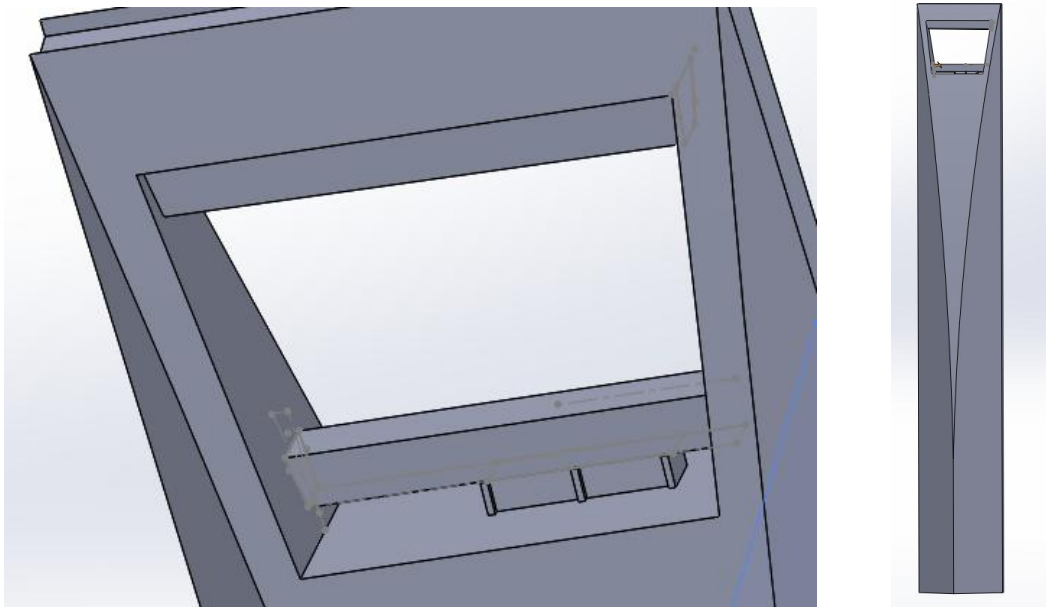


Figura 4.3.2.4. Pont i resultat final

5. INTRODUCCIÓ A L'ANÀLISI MODAL I AERODINÀMIC

5.1. Anàlisi modal en la dinàmica estructural

En què consisteix l'anàlisi modal?

Es tracta d'un mètode d'anàlisi per detectar problemes vibratoris en una estructura en el qual s'excita aquesta en un rang de freqüències i s'observa la resposta resultant. És una manera de descriure les propietats dinàmiques de l'estructura per mitjà dels modes vibratoris d'aquesta. Cadascun dels modes vibratoris que s'observen té una freqüència pròpia que la fa vibrar i una forma de vibrar i un amortiment propis.

Per tal d'aprofundir una mica en el tema primer cal fer uns incisos sobre dinàmica estructural. La referència bibliogràfica per l'explicació s'ha tret del llibre *Comportament dinàmic de màquines hidràuliques*[].

5.1.1. Sistema senzill

Les estructures són susceptibles a vibrar, i aquesta vibració en forma de moviment oscil·latori es pot escriure matemàticament de la forma següent (Eq 5.1.1.1)

$$x = x_0 \cos wt \quad (\text{Eq. 5.1.1.1})$$

- x: posició [m]
- x_0 : desplaçament màxim [m]
- t: temps [s]
- w: pulsació $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$, sent $w=2\cdot\pi\cdot f$
- f: freqüència [Hz]

En la representació de la funció sinusoidal el desplaçament màxim (x_0) correspon als màxims de la funció, és a dir, a la imatge dels punts temporals on la funció val x_0 o $-x_0$.

Si es considera un sistema oscil·latori format per una molla, una massa i un amortidor que

representa la dissipació d'energia durant el procés, en el qual la massa només es pot moure en una direcció, l'equació anterior es pot reescriure en forma exponencial complexa (Eq 5.1.1.2):

L'equació anterior es pot reescriure en forma exponencial complexa de la següent manera (Eq 5.1.1.2)

$$x = x_o \cdot e^{j\omega t} = x_o(\cos \omega t + j \cdot \sin \omega t) \quad (\text{Eq 5.1.1.2})$$

Aquesta equació descriu el moviment rotatiu d'un vector de longitud x_o girant en sentit antihorari a velocitat ω . El vector queda projectat horitzontalment per la component del cosinus (part real) i projectat verticalment per la component del sinus (part imaginària), de tal manera que es continuen mantenint els màxims a x_o o $-x_o$.

La vibració de l'estructura es pot representar en forma desplaçament, però també com a velocitat o acceleració. En el cas del desplaçament el que es fa és indicar el recorregut que té l'estructura cap endavant i cap endarrere mentre vibra.

A la figura 5.1.1.1 es pot veure representat el sistema, amb la massa i la força aplicada externament $F(t)$ durant el moviment i les dues maneres de representar-lo matemàticament amb les equacions descrites (de forma sinusoidal i circular).

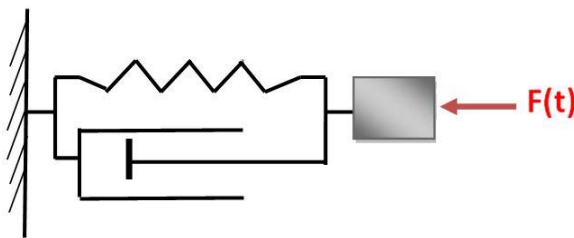


Figura 5..1.1.1. Sistema d'estudi

A més a més, a partir de la mecànica newtoniana també es pot trobar l'equació del moviment. En el cas d'un sistema amb el moviment en una sola direcció (1 sol grau de llibertat) l'equació del moviment es pot expressar en forma d'equació diferencial (Equació 5.1.1.3)

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = F(t) \quad (\text{Eq. 5.1.1.3.})$$

En el cas que no existís amortidor en la modelització del sistema (pèrdues negligibles) l'equació quedaria sense component de velocitat (Eq. 5.5.5.4), ja que la força d'atracció exercida per un amortidor és proporcional a la velocitat d'allargament, eq. 5.5.5.5.

$$M\ddot{x} + kx = F(t) \quad (\text{Eq. 5.1.1.4})$$

$$F^{At,am} = c \cdot \dot{x} \quad (\text{Eq 5.1.1.5})$$

Els diferents paràmetres d'aquestes dues equacions representen:

- M: massa [kg]
- C: coeficient d'amortiment $\left[\frac{kg}{s}\right]$
- K: constant de rigidesa $\left[\frac{N}{m}\right]$
- F(t): Força externa aplicada al sistema [N]

Per tant, una primera aproximació és treure la força $F(t)=0$, deixant el sistema vibrant de forma lliure, i si se substitueix la primera equació del moviment en l'equació 5.5.5.3 s'obté l'expressió de la pulsació natural.

$$w_n = -\frac{c}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2M}\right)^2 + \left(\frac{k}{M}\right)} < \frac{K}{M} \quad (\text{Eq. 5.1.1.6})$$

Si el valor de C és diferent de zero hi haurà tres tipologies de solució de pulsació natural.

- Cas 1: $w_n = \frac{c}{2M} < \frac{K}{M}$

- Cas 2: $w_n = \frac{c}{2M} = \frac{K}{M}$

- Cas3: $w_n = \frac{c}{2M} > \frac{K}{M}$

En canvi, en el cas d'haver aproximat el moviment no només com a vibració lliure sinó també sense pèrdues traient l'amortidor en l'equació 5.1.1.5, és a dir, $C=0$, la pulsació té una expressió més senzilla.

- $w_n = \sqrt{\frac{c}{2M}}$

Tornant al cas general amb amortiment, les tres solucions de l'equació representen diferents tipus de sistemes. Només el primer cas representa oscil·lació i s'anomena sistema subamortit. El segon i el tercer, en els que no hi ha oscil·lacions, s'anomenen d'amortiment crític i sobre amortit, respectivament.

Per tant, és el valor de $\frac{c}{2M}$ comparat amb el de $\frac{K}{M}$ el que delimitarà la tipologia dels sistemes, segons si hi ha oscil·lació o no.

A la figura 5.1.1. 2 es representen els 3 tipus de sistemes segons el moviment que tinguin.

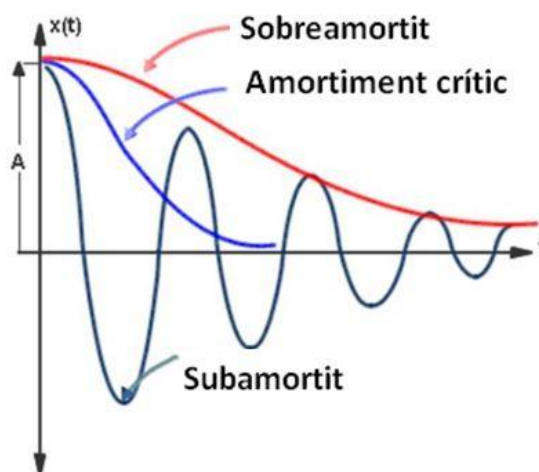


Figura 5.1.1.2. Tipus de sistemes segons el moviment

El valor del coeficient d'amortiment C pel cas 3, (sistema d'amortiment crític) s'anomena coeficient d'amortiment crític C_c .

El valor de C es coneix com el coeficient d'amortiment crític C_c quan aquest pren el valor de $\frac{K}{M}$ (cas 2), ja que és la situació que delimita el fet que hi hagi o no amortiment. És a dir:

$$C = \frac{C}{2M} \text{ i } C_c = \frac{C}{2M} = \frac{K}{M}$$

S'anomena relació d'amortiments (ζ) al quocient entre el coeficient d'amortiment C d'un sistema qualsevol i el coeficient d'amortiment crític C_c (equació 5.1.1.7).

$$\zeta = \frac{C}{C_c} \text{ (Eq. 5.1.1.7)}$$

La relació d'amortiments també classifica els sistemes com ho fa el quocient $\frac{C}{2M}$ ja que estan relacionats com s'acaba d'exposar. Segons la relació d'amortiments la classificació és:

- $\zeta = 1$
La relació d'amortiments val 1 en el cas del sistema d'amortiment crític, ja que en aquest $C=C_c$. El sistema no oscil·la.
- $0 < \zeta < 1$
Quan aquest valor està entre 0 i 1 no inclòs hi haurà oscil·lació (cas 1, moviment subamortit)
- $\zeta < 0$
Si la relació d'amortiments és negativa les vibracions es tornen autoexcitades, amplificant l'amplitud de la vibració paulativament. Per tant, no hi ha oscil·lacions.

En qualsevol mode de vibració existeixen uns punts anomenats nodes que són fixes (l'amplitud de la seva oscil·lació és nul·la), i uns ventres, on l'amplitud és màxima. Veure figura 5.5.5.3, on s'observen els modes vibratoris normals d'una corda per un instant de temps fixat en una corda.

Una manera senzilla d'il·lustrar aquest fenomen és amb l'exemple d'una corda fixada pels

seus dos extrems.

En una corda subjecta pels seus dos extrems, la vibració té direcció transversal a ella, i l'ona que es propaga, ho fa en la direcció longitudinal. Per una mateixa corda, l'ona serà diferent (tindrà més o menys ventres) segons el mode de vibració estudiat.

L'ona que es propaga al llarg de l'eix longitudinal de la mateixa quan arriba a l'extrem és reflexada, alhora que des de l'extrem inicial també n'està sortint una si es continua vibrant, per tant n'hi ha en els dos sentits. Aquestes ones poden coincidir o no. Quan ho fan, que és quan l'ona reflexada per l'extrem final surt cap a l'extrem inicial amb la mateixa fase que la d'entrada, és a dir, quan la d'entrada arriba és quan la reflexada surt cap a l'inici, ambdues se sumen. La suma és tal que en els extrems la suma serà nul·la (l'una arriba i l'altre just marxa), mentre que en posicions intermitges, com que ambdues són d'igual amplitud i freqüència perquè són del mateix sòlid confinat entre dos extrems, hi haurà punts en els que la suma serà l'amplitud màxima de totes dues. Si es dibuixes la posició d'aquests punts (amplitud) en l'eix transversal, es veuria com els punts de suma màxima són els ventres i els punts extrems són nodes, juntament amb altres nodes de l'ona suma que s'ha produït en el sistema. Aquesta ona suma s'anomena ona estacionària i si es fàcilment visualitzable com una ona "fixa" en l'espai mentre es mantingui aquella freqüència de vibració si es fa un experiment amb una corda i un generador de freqüències que l'excita. Les partícules de corda es mouen, per tant, transversalment, amb una amplitud màxima transversal en els punts que són ventres, de tal manera que en aquests punts, per a aquesta freqüència pròpia del sistema, es mouran amb tota l'amplitud màxima, transversalment i els nodes es mantindran sempre fixos per a aquesta freqüència, en el mateix punt que estarien si la corda romangués en repòs.. L'ona estacionària visualitzada, però, no és més que la suma de les dues ones que es propaguen per l'eix longitudinal. Quan això es produeix hi ha ressonància en el sistema.

Aquests casos de coincidència succeeixen en diverses situacions, dependent de com sigui l'excitació que fa vibrar la corda. És a dir, hi haurà ressonància si aquesta vibració és correspon a una freqüència pròpia del sistema, que produeix aquesta situació de suma d'ones d'anada i reflexada i l'amplitud de les oscil·lacions serà elevada.

La diferència entre els diferents modes propis de vibració en una corda és el nombre de nodes que apareixen entre els extrems. Així, pel primer mode de vibració, només hi ha dos nodes (els extrems) i un ventre, just a la meitat de la distància de la corda. En el segon, hi ha 4 nodes, els dos dels extrems i dos d'intermedis, ja que l'ona estacionària que es pot encabir en la longitud de la corda té dos nodes més, i, per tant, 2 ventres.

A la figura 5.1.1.3 es poden veure els 4 primers modes de vibració d'una corda. EL que s'observa és l'ona estacionària. El primer mode és el que té un període T més gran, per

tant, menor freqüència.

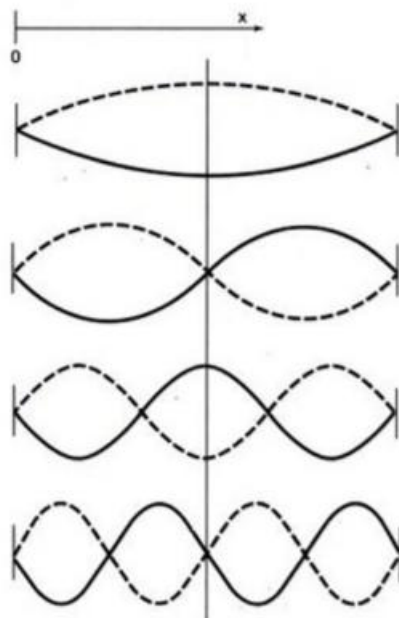


Figura 5.1.1.3. Els 4 primers modes de vibració propis d'una corda fixada pels seus dos extrems

En el cas que ocupa aquest treball, però, es tracta de sòlids en que només hi ha una condició de contorn d'extrem fixat, per tant les formes de vibrar dels modes serien diferents. De fet, es tracta de sistemes molt més complexos com es veurà en el punt 5.1.3.

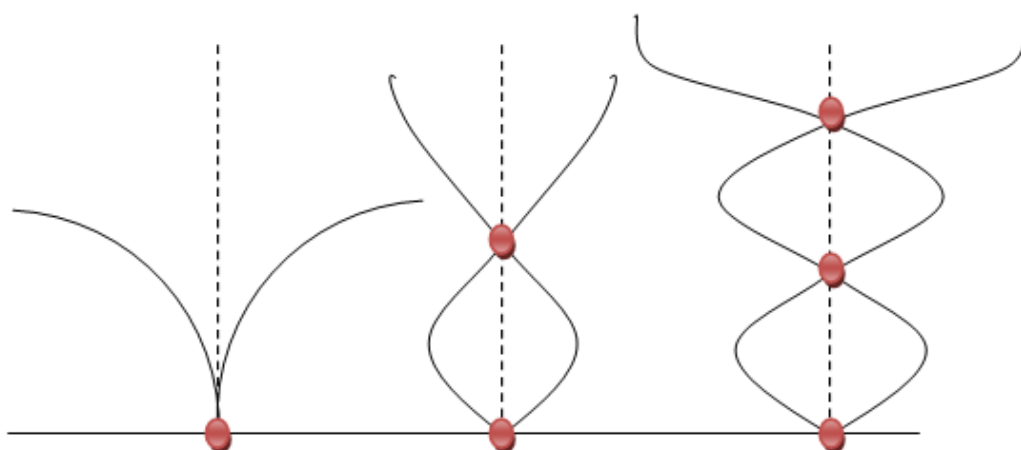


Figura 5.1.1.4. Els 3 primers modes de vibració propis d'un sòlid fixat per un extrem

A continuació es mostra una taula de com serien els tres primers modes de vibració d'un sòlid com ara una barra fixat en un dels seus extrems i deixant-lo lliure a l'altre.

Com es veurà més endavant amb l'anàlisi dels modes dels diferents edificis estudiats, aquests podran englobar moviments de rotació entorn a uns nodes, així com translacions

5.1.2. Ressonància

Es produeix ressonància quan la freqüència de l'excitació és igual a una freqüència pròpia del sistema, fent que la vibració s'incrementi i podent posar en perill l'estructura.

En el cas de fenòmens que poden arribar a causar ressonància, és interessant el càlcul de la freqüència de desprendiment de vòrtex. Un vòrtex és un flux turbulent que rota en espiral sobre si mateix en trajectòries de corrent tancades.

Una de les causes de ressonància més importants són precisament els desprendiments de vòrtexs, que és un fenomen dinàmic, produït pel fluid en moviment i l'evolució del fenomen al llarg del temps. És un procés per mitjà del qual es generen vòrtexs alternativament al deixant dels cossos, en aquest cas els edificis; al darrere, i aquests es desprenen i s'arrossegueu aigües avall del fluid, produint forces d'oscil·lació transversals i longitudinals, que fan que les forces d'arrossegament i de sustentació no siguin constants. Aquestes vibracions en ambdues direccions, alhora, estan relacionades amb la freqüència amb que es desprenen i que interessaria conèixer.

Quan aquesta freqüència de desprendiment coincideix amb la freqüència pròpia de l'estructura (o una d'elles, com es veurà en l'apartat 5.5.3 de més d'una freqüència pròpia) s'incrementa la vibració. En altres paraules, quan s'entra en ressonància els vòrtexs generats darrere de les estructures s'amplifiquen paulativament cada vegada més.

Quan la primera freqüència de desprendiment coincideix amb la primera pròpia de l'estructura, la intensitat dels vòrtexs s'amplifica, incrementant les forces. No obstant, els petits increments de velocitat de l'aire no fan variar la freqüència del desprendiment.

Si l'aire augmenta de velocitat de nou les vibracions disminuiran fins que es torna a trobar una altra situació de ressonància (en aquest cas, la segona freqüència pròpia de l'estructura), i així successivament fins a arribar a entrar en ressonància amb la tercera freqüència pròpia, etc.

Els consideren pertorbacions importants degut a que generen fluctuacions de pressió i en la ressonància vibracions estructurals importants. En el cas de que l'estructura estudiada fos un avió això és molt perillós ja que les diferències de pressió causen variacions en la

sustentació, però no es pot menystenir l'efecte d'entrar en ressonància en qualsevol estructura.

La freqüència de desprendiment (f_{vs}) es pot calcular mitjançant diagrames d'Strouhal/Nombre de Reynolds i a partir de l'equació que determina el nombre d'Strouhal. (Eq 5.1.1.2.1)

$$S_h = \frac{f_{vs} \cdot D}{v} \quad \text{Eq. 5.1.1.2.1}$$

- D: dimensió característica del cos [m]
- v: velocitat del fluid $\left[\frac{m}{s}\right]$
- S_h : Nombre d'Strouhal, adimensional, determinat a partir del Reynolds i el Gràfic
- f_{vs} : freqüència de desprendiment, que es calcula aïllant-la de l'equació [Hz]
- R_e : Nombre de Reynolds, adimensional, calculat a partir dels paràmetres anteriors

Per tal d'evitar l'aparició o la intensitat dels vòrtexs és útil modificar la forma posterior de l'element en qüestió per tal que aquests ja siguin de per si menys intensos, per exemple posant filaments o rugositats al darrere d' on se solen produir (veure figura 5.1.2.1) o variar la secció en alçada per tal d'evitar que si es troba una freqüència de desprendiment de vòrtex, aquesta afecti globalment a tota l'estructura (figura 5.1.2.2.).



Figura 5.1.2.1. Cantonades rugoses per evitar el fenomen del desprendiment de vòrtexs. Font [8]



Figura 5.1.2.1. Seccions en gir (variació en alçada) per evitar el fenomen del despreniment de vòrtexs.
Font: [9]

Una altra alternativa és dissenyar l'estructura per tal que els seus modes propis de vibració no coincideixin amb aquestes freqüències. Això es pot fer canviant el que governa el sistema: la rigidesa i l'amortiment. Hi ha uns elements anomenats dampers. Per exemple, la Shanghai World Financial Center (SWFC) en disposa. La CN Tower de Toronto també en té, penjats de l'antena [10] Aquests sistemes redueixen la magnitud del moviment lateral ocasionat mitjançant la creació d'una força contrarestant.

A la figura 5.1.2.3 es pot veure el fenomen del despreniment de vòrtex en diferents superfícies d'edificis.

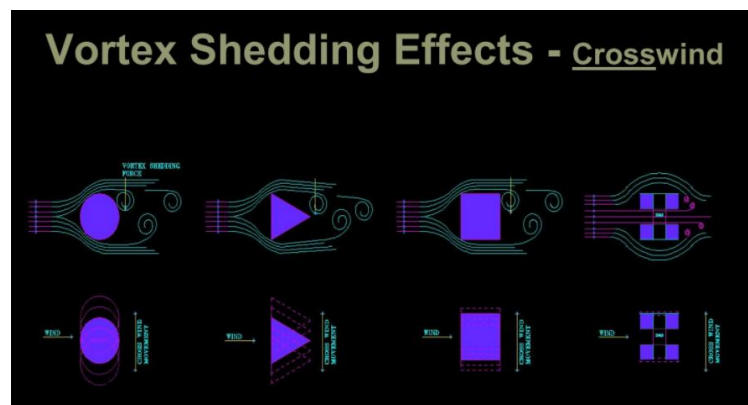


Figura 5.1.2.3. Despreniments de vòrtex per diferents formes de la planta d'edificis Font: [9]

Quan es parla de ressonància no convé oblidar l'altre força excitadora causant, molt important en temes estructurals d'edificis i estructures, els sismes.

En aquest fenomen el moviment oscil·latori es transmès a través de la cimentació de l'estructura a la resta dels elements, fent que tota la mateixa tingui aquella freqüència, que, en el cas de ser una pròpia acabaria en ressonància amplificant les oscil·lacions. El moviment oscil·latori, en especial si és exagerat, exigeix més ductilitat a l'estructura de la que pot tenir i probablement pot acabar provocant fissures del material, el formigó en el cas d'edificis. Moltes oscil·lacions seguides també poden induir fatiga a l'estructura, fent que s'acabi trencant.

Altres fenòmens dinàmics d'excitació relacionats amb el vent que poden produir ressonància són les ràfegues de vent, i els fenòmens del flutter i el galloping (vibracions autoexcitades). Per exemple el Tacoma Narrows Bridge de Washington, que es va ensorrar el 1940, va ser degut al fenomen del flutter i al despeniment de vòrtex combinats (figura 5.1.2.4)



Figura 5.1.2.4. Pont de Tacoma ensorrat

5.1.3. Sistemes complexos

Quan els sistemes depenen de dues o més masses discretes (cada massa amb el seu grau de llibertat), hi haurà dues o més freqüències pròpies en comptes d'una, cadascuna amb el seu mode vibratori propi. De fet, una estructura real es pot considerar com un conjunt de sistemes interconnectats, on el nombre de modes vibratoris pot ser molt gran i l'equació s'ha de descriure de forma matricial.

$$[M][\ddot{x}] + [C][\dot{x}] + [K][x] = \{F(t)\} \quad \text{Eq. 5.1.3.1}$$

- $[M]$: matriu de masses
- $[C]$: matriu d'amortiment
- $[K]$: matriu de rigideses
- $[\ddot{x}]$: vector acceleració dels nodes
- $[\dot{x}]$: vector velocitat dels nodes
- $[x]$: vector desplaçament dels nodes
- $F(t)$: vector de força externa

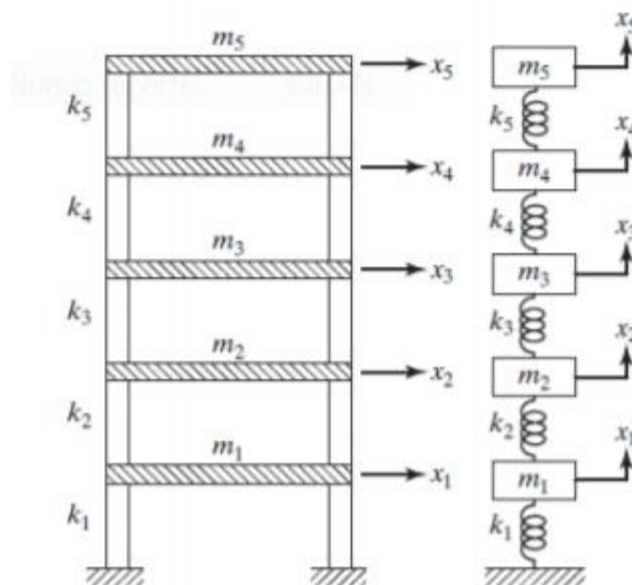


Figura 5.1.3.1. Sistema complex: representació d'uns pisos Font: [11]

De forma esquemàtica, les diferents masses (per exemple pisos) estan unides entre sí i al terra a través de molles (força elàstica), que representarien les columnes i amortidors (força dissipativa ja que existeixen friccions i el sistema no és conservatiu a la vida real). El sistema tindrà n graus de llibertat i freqüències pròpies, així com n maneres de vibrar diferentment.

Un cop esmentada l'estructuració del problema teòric, cal tenir en compte que quan la vibració es produeix dins d'un líquid, aquesta es veu afectada al mateix temps per una altre factor: el desplaçament de l'estructura desplaça part del líquid en la que esta continguda, fent que l'equació general es torni més complexa. No obstant, en aire aquesta interacció és poc important, i, per tant, no es tindrà en compte, ja que en aquest treball s'estudien edificis.

L'estudi de la resposta en funció de la Força també es podria dividir en dos, segons si els paràmetres M , C o K de l'equació del moviment del sistema depenen alhora del temps; sinó es tracta de forma lineal.

En el cas de comportament lineal, que és el més senzill, l'estudi també es pot subdividir en funció de si la força que excita l'estructura és periòdica o no.

En el cas que sigui periòdica l'equació queda de la següent manera:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t + \Phi) \quad \text{Eq. 5.1.3.2}$$

- M : massa [kg]
- C : coeficient d'amortiment $\left[\frac{kg}{s}\right]$
- K : constant de rigidesa $\left[\frac{N}{m}\right]$
- F_0 : Força màxima externa aplicada al sistema [N]
- ω : pulsació de la força excitadora $\left[\frac{rad}{s}\right]$
- ϕ : angle que es retrassa la resposta de l'estructura respecte la força excitadors

En aquest cas la resposta de l'estructura es retrassa respecte la força excitadora un angle Φ i per trobar la solució es superposa la solució homogènia (sense la Força d'excitació) i la solució particular (amb la força d'excitació). En sistemes amb la vibració lliure (sense Força d'excitació) la solució total és la mateixa que la homogènia.

De ta manera que la solució de l'equació en estat estacionari és la següent:

$$x_o = \frac{\frac{F_o}{K}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{w_s}{w_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\zeta w_s}{w_n}\right)^2}} \quad \text{Eq. 5.1.3.3}$$

Hi ha tres tipus de forces oposades a la força d'excitació en el sistema estudiat: les forces elàstiques, les d'amortiment i la d'inèrcia. Les elàstiques, tal com es pot veure en l'equació del moviment 5.1.3.2 van relacionades amb el desplaçament, les d'amortiment amb la velocitat, i les d'inèrcia amb la massa i l'acceleració.

- A freqüències d'excitació per sota de la de ressonància el moviment el controla l'elasticitat, que van en sentit contrari al moviment, per tant més força d'oposició al moviment.
- A freqüència d'excitació igual a la pròpia (per tant ressonància) el moviment el controla l'amortiment (els termes d'elasticitat i forces d'inèrcia es cancel·len en ser paral·lels de sentit contrari).
- A freqüència d'excitació per sobre de la pròpia el moviment és controlat per la massa (forces d'inèrcia), ja que és el que domina. Aquest fenomen es pot observar en els diagrames vectorials de la figura 5.1.3.1

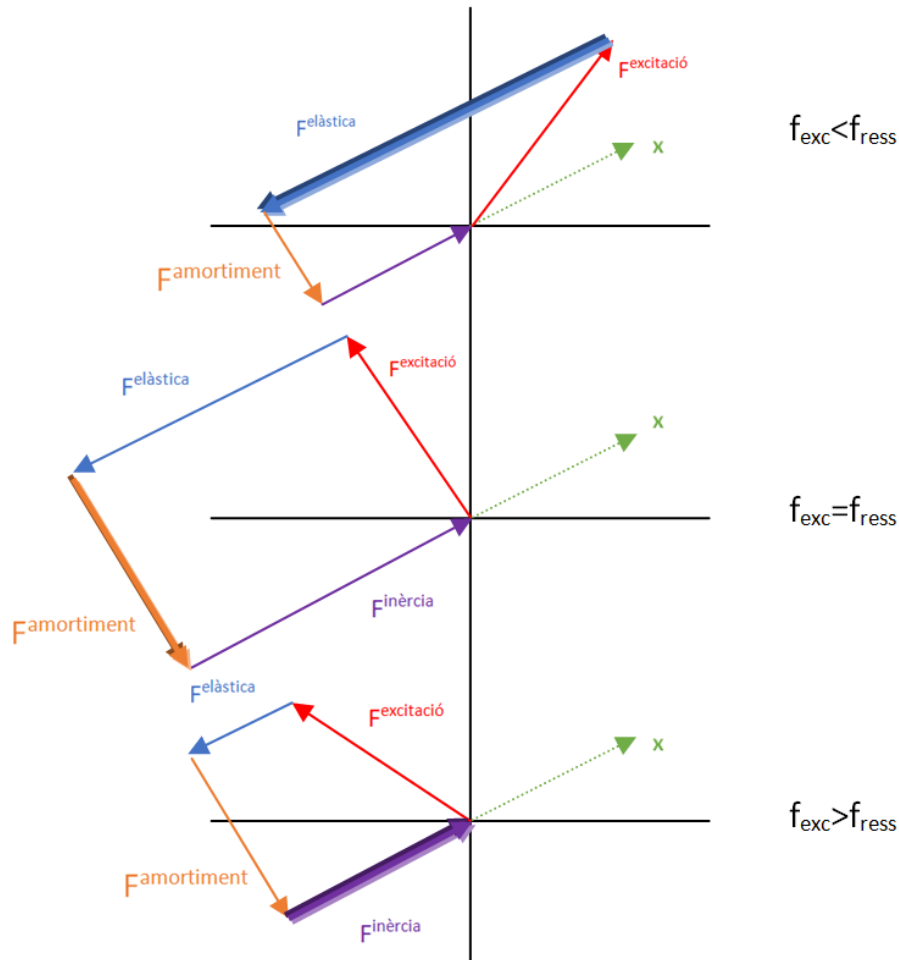


Figura 5.1.3.1 Diagrames vectorials dels tres casos de freqüència d'excitació

Per altra banda, les excitacions no periòdiques es representen mitjançant espectres d'excitació.

Així doncs, en una estructura com és un edifici es preveuen un seguit de freqüències pròpies i quan la freqüència de la força excitadora s'igual a qualsevol d'elles per separat, es produeix ressonància.

5.1.4. Anàlisi modal a nivell experimental

La manera de calcular les freqüències pròpies d'una estructura a nivell experimental consisteix en fer-ne un anàlisi modal: excitar-la amb una força exterior (que tingui una freqüència en el rang de freqüències d'interès a estudiar) i veure'n la resposta resultant.

En assaigs in situ s'usen martells instrumentats les puntes del qual tenen diferent duresa per tal d'excitar diferents rangs de freqüència (les puntes toves exciten freqüències més baixes). L'estructura tindrà diferents captadors de vibracions que mesuraran la vibració generada pel martell. El resultat es pot representar de diferents maneres. Una d'elles és com l'amplitud i la fase de la freqüència, de tal manera que si s'observa un pic se sabrà que aquella és una freqüència pròpia de l'estructura perquè per una mateixa força la resposta és major. (Veure figura 5.1.4.1).

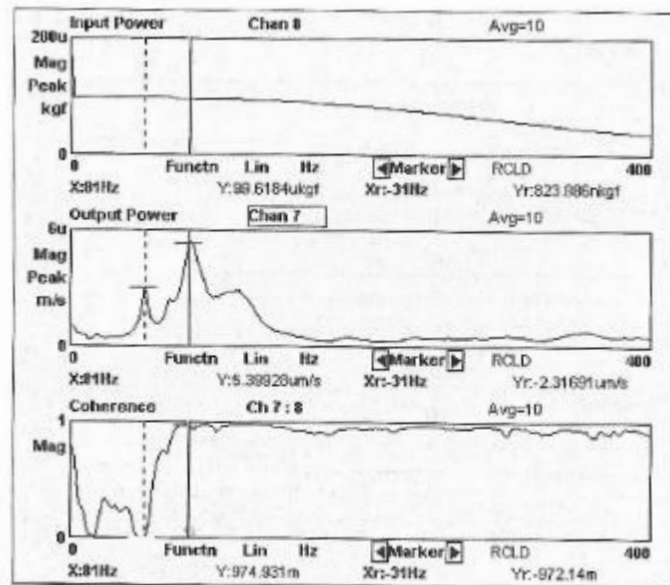


Figura 5.1.4.1 Observació d'una freqüència pròpia a nivel experimental

Font: Comportament dinàmic de màquines hidràuliques

En la primera gràfica apareix l'espectre de la força de l'excitació. En la resposta, segona gràfica, hi ha dos pics. El de l'esquerra és un senyal relacionat amb la força del Martell excitador, degut a que la coherència és 1 en la tercera gràfica; mentre que el segon pic té coherència nul·la, i indica que no té relació amb la força del martell

5.2. Conceptes basics d'aerodinàmica

Un fluid és tota aquella substància que sota un petit esforç tallant adquireix deformabilitat i mobilitat.

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que estudia les accions que apareixen sobre sòlids quan hi ha un moviment relatiu entre aquests i el fluid (gas).

En mecànica de fluids i en l'aerodinàmica en particular hi ha un seguit de nombres adimensionals que ajuden a determinar comportaments i patrons entre els diferents sòlids i el fluid. Un dels paràmetres més importants és el nombre de Reynolds (Re).

El Reynolds relaciona les forces d'inèrcia amb les viscoses, és proporcional a la velocitat del fluid per una magnitud característica i inversament proporcional a la viscositat cinemàtica. El valor del Reynolds determina si el flux serà laminar o turbulent (Eq. 5.2.1)

$$Re = \frac{\rho u \cdot D}{\mu} = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (\text{Eq. 5.2.1})$$

- u: velocitat del fluid $\left[\frac{m}{s}\right]$
- ρ : densitat $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- D: dimensió característica [m]
- μ : viscositat dinàmica del fluid $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$
- ν : viscositat cinemàtica del fluid $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

En general, un flux laminar és aquell de $Re \leq 2300$

$Re > 10000$ es considera turbulent. I els valors intermedis són de flux de transició.

Un flux laminar és aquell de perfil parabòlic amb moviment suau i ordenat, i velocitat màxima en el seu centre, mentre que en el turbulent, que es dona a velocitats de fluid altes i/o les forces viscoses són molt petites, com seria l'aire. És un flux de trajectòries desordenades.

L'equació de continuïtat és la de conservació de la massa d'un sistema (Eq. 5.2.2)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{c}) = 0 \quad (\text{Eq. 5.2.2})$$

Si la densitat del fluid es manté constant és té que: (eq. 5.2.3.):

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (\text{Eq. 5.2.3})$$

Principi de Bernoulli (aplicable si hi ha línies de corrent), equació 6.1.4, sense pèrdues per fricció ni de treball mecànic:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (\text{Eq. 5.2.4})$$

Les forces aerodinàmiques són les de resistència a l'avanç, aquesta en la direcció i sentit del fluid; i la de sustentació, en component vertical al cos (figura 5.2.1).

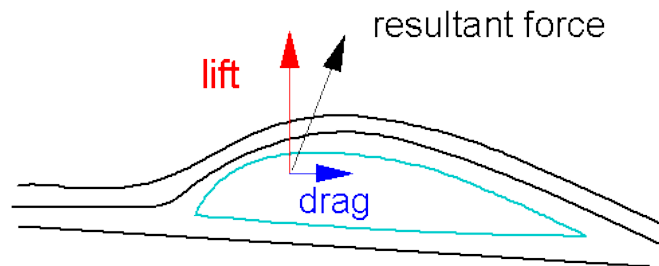


Figura 5.2.1. Forces aerodinàmiques en un perfil aerodinàmic

La força de resistència a l'avanç o força de drag és la que interessa més en el cas d'edificis. Aquesta es calcula a partir del coeficient de drag o d'arrossegament, adimensional, que depèn de la forma del cos. Com menor sigui el cd, menor és aquesta força resultant. No obstant, aquesta força també dependrà de la velocitat del fluid (vent).

5.3. Anàlisi aerodinàmic estàtic

5.3.1. Efecte del vent

La força del vent té un efecte molt important en l'estructura. Una estructura està sotmesa a càrregues verticals (pes) i càrregues horitzontals (vent). L'estudi estàtic es fa en Computational Fluid Dynamics (CFD) per trobar el c_d i la F_D , i aquesta aplicada al centre de masses del cos equival a la força de càrrega horitzontal.

L'anàlisi en CFD també indica com d'aerodinàmica és l'estructura; com més aerodinàmica (menor c_d) el fluid flueix millor. En canvi, l'estudi dinàmic realitzat en aquest treball se centra en l'anàlisi modal, que és la cerca de les freqüències naturals de l'estructura. Aquestes freqüències, com s'ha comentat anteriorment, poden entrar en ressonància si la freqüència de les forces excitants (aspectes dinàmics com ara ràfegues de vent en direcció longitudinal o transversal a l'estructura; sent aquestes molt importants, o desprendiments de vòrtexs, sismes...) coincideixen amb alguna d'aquestes pròpies. A partir de la superfície que envolta el fluid es poden trobar valors de nombre d'Strouhal diferents, i per tant freqüències de desprendiment associades diferents, si l'excitació són els vòrtexs. Per evitar-ho, és millor que l'estructura tingui formes diferents al llarg de la seva alçada, així si hi ha alguna freqüència que afecti l'edifici no l'afectarà globalment.

Per altra banda, a nivell de CFD també es podria fer un anàlisi dinàmic, per exemple, si es fessin anàlisis transitoris per observar els possibles desprendiments de vòrtexs, i en aquest sentit, es relacionarien els dos àmbits, però aquest enfocament no és objecte d'aquest treball.

Així doncs, es farà un estudi estacionari de l'efecte del vent en l'estructura. Això implica abans calcular la força que fa el vent sobre aquesta (càrrega horitzontal). Per fer aquest càlcul, s'han d'introduir valors de velocitats del vent. Per saber què agafar s'ha fet una mica de recerca.

El coeficient de rugositat és de 0,4 en terrenys urbans amb edificis alts. Per exemple a 1500 peus es tenen 90 milles per hora, és a dir, a 460 m d'alçada es poden arribar a tenir 40 m/s, que són 144 km/h.

Hi ha una fórmula que relaciona velocitats del vent a una alçada amb una altra, eq. 5.3.1:

$$U = u_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (\text{Eq. 5.3.1})$$

Si s'observa la següent gràfica (figura 5.3.2) es poden veure valors de velocitat anual màxims del vent a la zona del Canadà a alçada de 30 peus. Surten 50 milles per hora a 9 metres, és a dir, 80 km/h o 22 m/s.

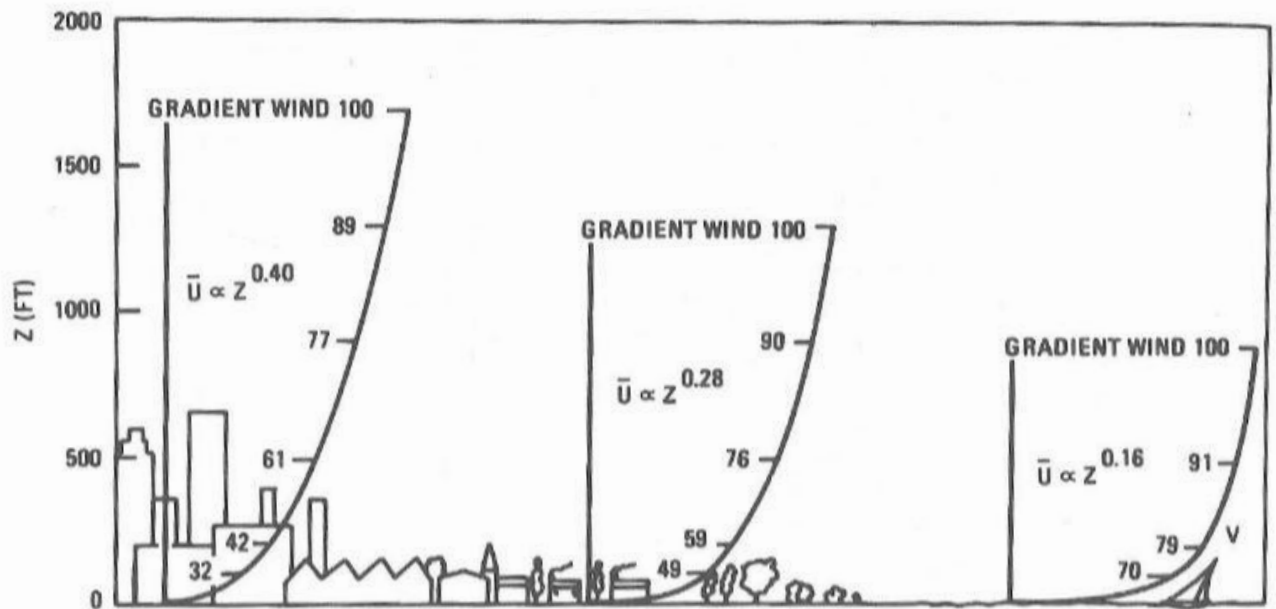


Figura 5.3.1. Perfils de velocitat del vent en diferents regions. Font: *Applied Fluid Dynamics Handbook*

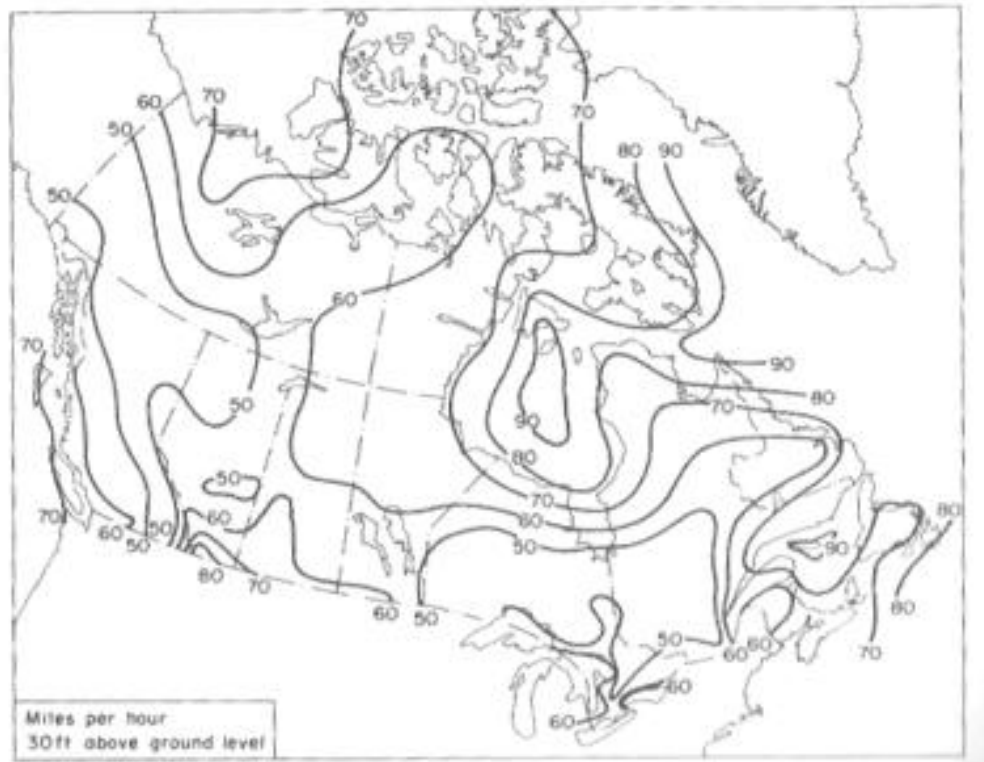


Figura 5.3.2. Velocitats màxims anuals al Canadà a alçada de 30 peus.

Applied Fluid Dynamics Handbook

Aplicant la fórmula per aquest valor màxim anual a l'alçada de 370 m (punt més alt del mirador):

$$u = 22 \left(\frac{370}{9} \right)^{0,4} = 97,27 \text{ m/s}$$

Per altra banda, de l'informe de la Torre de Shanghai [12] se sap quines velocitats de vent hi havia per certa alçada (la torre té una alçada similar). Es deia que a 470 metres d'alçada es van mesurar en un dia qualsevol 16,33 m/s. Si s'aplica la fórmula extrapolant-ho en aquesta alçada:

$$u = 16,33 \left(\frac{370}{470} \right)^{0,4} = 14,8 \text{ m/s}$$

Per tant el valor de la velocitat del vent teòricament podria prendre qualsevol valor entre aquests dos, s'agafaran 20 m/s per considerar-ho un valor una mica més alt que el normal, sense ser extrem.

5.3.2. Millores aerodinàmiques dels edificis

Els edificis han passat a ser cada vegada més alts, això els proporciona menys amortiment i menys rigidesa. Per tal de compensar aquest fet, molts dissenys busquen formes més suaus i aerodinàmiques, com per exemple arrodonir cantonades.

Segons Ali i Armstrong [13] les formes geomètriques circulars, cilíndriques, el·líptiques, piramidals, proporcionen més rigidesa estructural davant de les càrregues horitzontals del vent que les formes rectangulars. En concret la forma circular pot arribar a exercir un 20% menys de pressió.

Posar obertures en les parts superiors dels edificis també millora la resposta aerodinàmica, reduint els efectes de la pressió transversal i provocant menys despreniment de vòrtex. És el cas de la Shanghai World Financial Center.

Hi ha més eficiència contra les càrregues laterals del vent si la planta és simètrica [14].

6. ANÀLISIS MODALS

6.1. Anàlisi modal de la CN Tower de Toronto en Ansys Modal

6.1.1. Consideracions prèvies: materials

Per tal de fer una aproximació de la realitat el més fidedigna possible s'ha buscat informació sobre els diferents materials de construcció que conformen la torre.

La torre està composta per quatre parts diferenciades:

- Les columnes de la base que arriben fins als 332 m d'alçada.
- El mirador principal de tres pisos que va dels 332 m als 370 m (38 metres d'alçada).
- La base de l'antena i el mirador superior (dels 370 m als 457 m, per tant, 87 metres).
- L'antena de 96 metres, que va dels 457 m als 553 m.

Segons informació de la societat immobiliària de Canadà [1] la torre està formada pels següents materials:

- 40524 m³ de formigó
- 4535 tones d'acer reforçat
- 544,2 tones d'acer estructural
- 128 km d'acer post-tensionat

A més a més, la torre compta amb una antena de 96 metres fabricada amb "Stelcoly 50", un acer de gra fi de baixa aleació i alt límit elàstic fabricat per la companyia Stelco a Canadà [15], "HSLA steel": High Strength Low Alloy Steel.

Es va buscar informació del procés constructiu de la torre per tal de veure com es van distribuir els diferents materials per cada part de la torre. Al vídeo del canal "Discovery Max" [16] es revela que els cables d'acer post-tensionat envolten l'estructura de base en Y. Així també ho fa un documental original de l'època de la construcció sobre la companyia de Fundició del Canadà [17], que va subministrar l'acer.

A continuació es mostren imatges d'aquests dos documentals on es veu com està feta per dins.



Figura 6.1.1.1. Imatge d'animació del Documental de Discovery Max



Figura 6.1.1.2. Acer post-tensionat durant la construcció de la torre

En ambdós documentals de l'època, el de la Foundation Company i el de la construcció de la Torre parlen del formigó armat, a continuació es mostra una imatge d'aquest segon [18] en que es mostra com s'anava aixecant la torre.



Figura 6.1.1.3 Fonaments durant la construcció de la Torre.

Com Ansys Workbench Modal necessita saber el tipus de material del que està formada l'estructura que s'estudiarà, i aquesta clarament està formada per parts ben diferents, es va procedir a modelar un nou material que s'anomenà "formigó armat amb cables" que modelà les parts de la torre que conformen la columna en forma de "Y" i la base de formigó de l'antena, que inclou el mirador més elevat.

Per altra banda, el mirador principal de tres pisos està format per tot tipus de material: formigó armat, cables i acer estructural, com es pot comprovar en la foto en que hi estan instal·lant les bigues d'acer. Es va considerar agafar com a material l'acer estructural com a predominant per simplificació.



Figura 6.1.1.3 Mirador principal durant la construcció de la torre

Les propietats dels diferents materials coneguts (HSLA i acer de reforç) s'han consultat a les fonts [19] i [20]. Les propietats del formigó i de l'acer estructural ja estan implementades per defecte en Ansys.

Amb totes aquestes dades conegudes es van buscar les propietats mecàniques dels diferents materials i es va calcular la seva proporció.

Primer es calculen el volum total d'acerpost-tensionat emprat en cables, per tal de saber-ne els kg perquè es coneix la densitat.

Per trobar el volum dels cables prèviament s'ha de conèixer quants cables hi ha i el volum d'1 cable. S'ha fet la suposició, a partir de l'observació de fotografies i dels vídeos que 1 cable té un diàmetre de 0,01m, i es coneix que la llargada d'un és de 457 m (fent la suposició que cadascun va de dalt a baix per simplificar el càlcul).

	1 cable	xcables
llarg [m]	457	128000
dià[m]	0,01	
àrea [m^2]	0,000314159	
volum [m^3]	0,143570754	
xcables	280,0875274	
volumtotal [m^3]	40,2123776	

Taula 6.1.1.1 Volum d'acer post-tensionat. Sistema d'estudi

A partir d'aquí ja es poden trobar les proporcions de cadascun dels tres tipus de material (formigó, acer per reforçar el formigó i cables) per posar-les al material “formigó armat amb cables”.

	Formigó	Acer reforç	Post tensionat A36
Densitat [kg/m ³]	2300,000	7849,050000	7850
Mòdul Young [Pa]	30000000000,000	199000000000,000000	2,00E+11
Rati Poisson	0,180	0,300000	0,26
Mòdul compressibilitat G [Pa]	15625000000,000	160000000000,000000	1,60E+11
Mòdul rigidesa K [Pa]	12712000000,000	77221281682,000000	7,93E+10
	dtot[m]		128000
	d1cable[m]		280,0875274
kg (=volum*dens)	93205200,000	4535000,000000	315667,1642
tones	93205,200	4535,000000	315,6671642
tones totals	98055,867		
total kg	98055867,164		
proporció	95,053	4,624914	3,22E-01
proporció unitària	0,951	0,046249	3,22E-03

	Formigó armat amb cables	antena
Densitat [kg/m ³]	2574,506	7800
Mòdul Young [Pa]	38363379383,860	2,50E+11
Rati Poisson	0,186	0,29
Mòdul compressibilitat G [Pa]	22767000698,981	1,60E+11
Mòdul rigidesa K [Pa]	15909863081,767	7,72E+10

Taula 6.1.1.3. Nou material i propietats de l'HSLA de

Per tant, es tindrien tres tipus de materials diferents: formigó armat amb cables, acer estructural i acer de baixa aleació per l'antena.

Val a dir que després de fer la simulació es va tornar a fer un grup de simulacions però utilitzant una altra hipòtesi de treball: Totes les parts de l'edifici fent servir “formigó armat amb cables” excepte l'antena; és a dir, 2 tipus de material, que el mirador principal no tingués unes propietats diferents en comparació amb la resta. De fet, d'acer estructural se'n pot haver fet servir arreu, i també és una petita part de tot l'acer utilitzat tal com s'indica al primer apartat del capítol.

D'aquesta manera, s'han creat aquests dos nous materials des de l'Engineering Data de l'Ansys Modal (figures 6.1.1.4 i 6.1.1.5). Per tal de fer-ho, cal crear el nou material amb el nom desitjat i arrossegat les *Physical Properties* corresponents en els camps en blanc per tal d'omplir-les de valors. Més tard, en l'apartat de *Model* del Project, en el subapartat de

Geometry, se li assignarà a cada part de sòlid (o sòlid sencer dependent de l'edifici) els materials que corresponguin.

The screenshot shows the 'Outline of Schematic D2: Engineering Data' window. The left sidebar lists various material properties under categories like Physical Properties, Linear Elastic, Plasticity, and Strength. The main table lists materials: 'acer antenna', 'formigó armat amb cables', and 'Structural Steel'. The 'Properties of Outline Row 4: formigó armat amb cables' table is expanded, showing the following data:

Property	Value	Unit
Density	2558,8	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and...	
Young's Modulus	3,7882E+10	Pa
Poisson's Ratio	0,186	
Bulk Modulus	2,0107E+10	Pa
Shear Modulus	1,5973E+10	Pa
Field Variables		
Temperature	Yes	
Shear Angle	No	
Degradation Factor	No	

Figura 6.1.1.4. Propietats del formigó armat amb cables introduïdes en l'Engineering. Data

The screenshot shows the 'Outline of Schematic D2: Engineering Data' window. The left sidebar lists various material properties. The main table lists materials: 'acer antenna', 'formigó armat amb cables', and 'Structural Steel'. The 'Properties of Outline Row 3: acer antenna' table is expanded, showing the following data:

Property	Value	Unit
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and...	
Young's Modulus	2,1E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,29	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	8,1399E+10	Pa
Field Variables		
Temperature	Yes	
Shear Angle	No	
Degradation Factor	No	

Figura 6.1.1.5. Propietats de l'acer de l'antena introduïdes en l'Engineering. Data

6.1.2. Geometria i Mallat

6.1.2.1. Geometria

S'ha importat el sòlid per parts en format *iges* prèviament activant Units→ *Large Model Support*→*On* , ja que la torre fa 533 m d'alçada (veure figura 6.1.2.1.1) i si no es fes, el model no cabria.

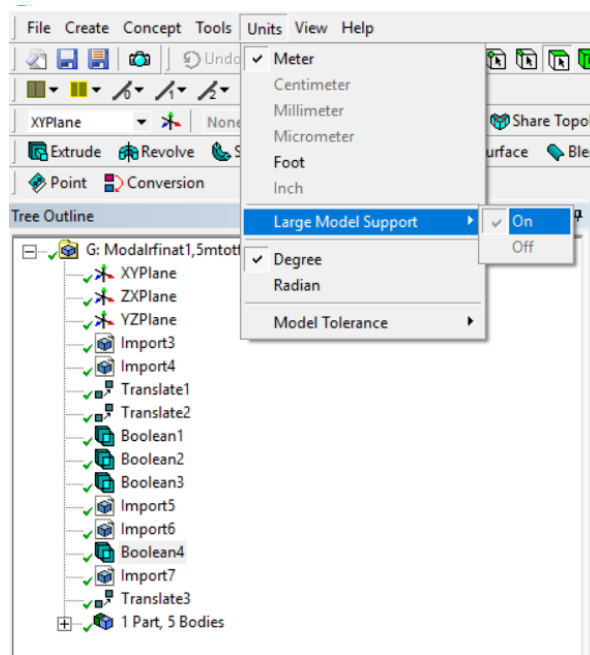


Figura 6.1.2.1.1. Activar Large Model Support

S'han hagut de fer diferents operacions per tal de importar les diferents parts, bàsicament operacions de translació en direcció vertical per tal de que el mirador, la base de l'antena i l'antena se situessin a la seva posició (figura 6.1.2.1.2) i booleans per tal de crear les regions buides dels miradors (figura 6.1.2.1.3).

En solidworks ha calgut fer les regions buides del mirador, però després l'Ansys les interpreta com omplertes. És per això que cal fer un booleà precisament per restar del sòlid mirador el sòlid que representa la part interior del mirador, que el programa interpreta com a no buida i com un sòlid dins del sòlid mirador.

De fet, si s'observa bé la figura 6.1.2.1.3, es pot comprovar com, un cop feta l'operació, sembla com si el resultat hagi estat d'omplir (es pot observar de color verd la zona que s'hauria de veure buida i en canvi el nucli de la torre es veu buit), però en realitat per Ansys es tot el contrari. És per això que al principi va ser una mica confús entendre com

funcionava aquesta operació perquè visualment no és molt intuïtiva a diferència de les translacions o rotacions.

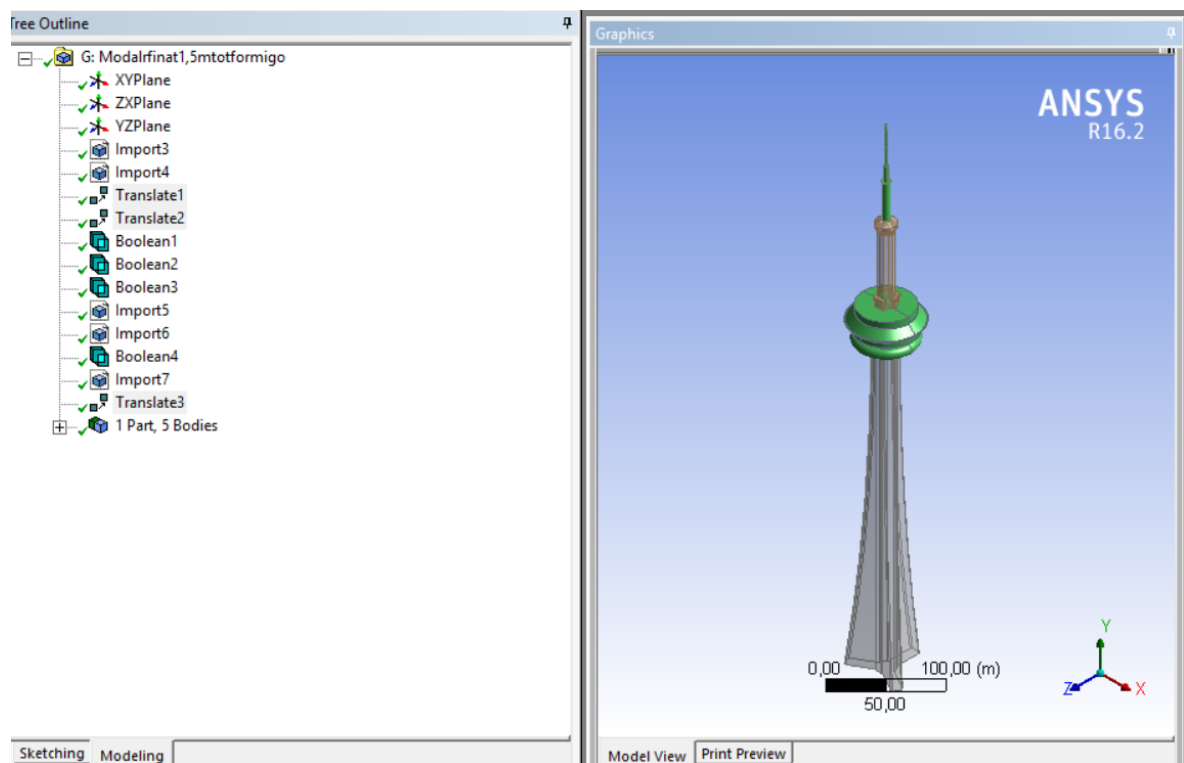


Figura 6.1.2.1.2. Operacions de translació

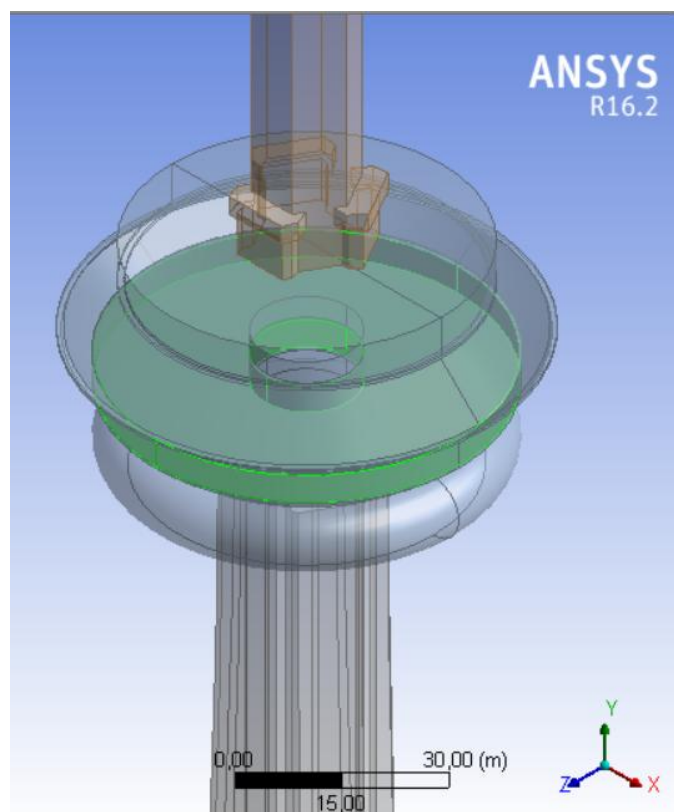


Figura 6.1.2.1.2. Booleans de buidat

La geometria a malla està formada per les diferents parts en que s'ha subdividit el sòlid importat. Veure Figura 6.1.2.1.1, part superior esquerra, cal dir-li al programa que s'ha de subdividir el total per assignar-los-hi a cadascuna d'elles el material corresponent.

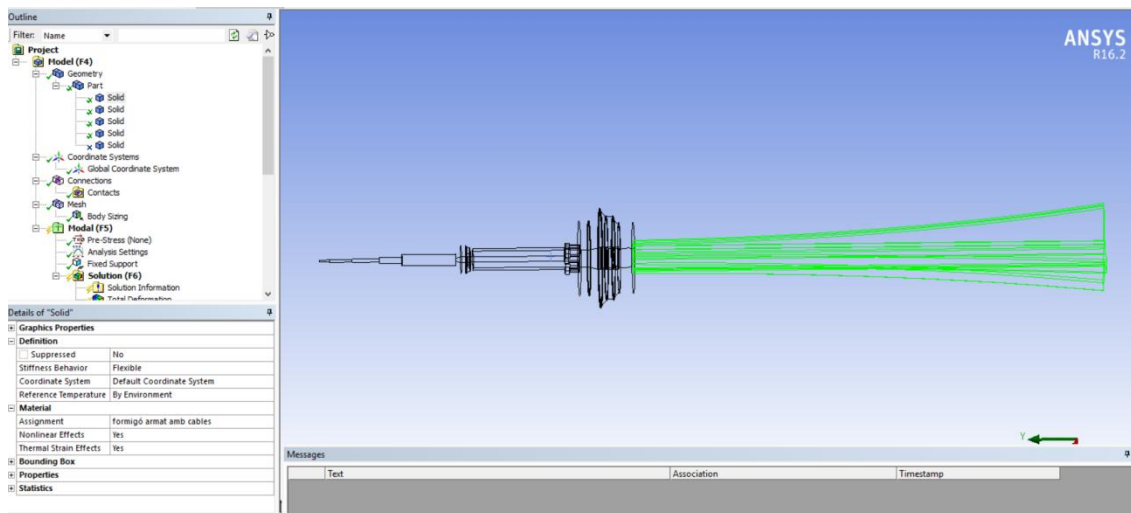


Figura 6.1.2.1.1 Detall de la "part" primera del sòlid on es pot veure que se li ha assignat el material compost.

6.1.2.2. Mallat

Per les dues situacions (dos o bé tres materials diferents) s'han fet els mateixos mallats. Començant per elements tetraèdrics de 2 m, després de 1,5 m i finalment d'1m, que és el que té un cost computacional més elevat. Com que es van refer les simulacions després de les de l'hotel Vela i es va veure que per aquest mallats amb elements majors a 2 m no eren adequats, aquí es va considerar començar pel de 2 metres ja que cada simulació triga molt temps en aquest edifici degut a la seva gran alçada.

A la figura 6.1.2.2.1 es pot veure un detall de la malla i a la taula 6.1.2.1.1 el número d'elements de cada simulació.

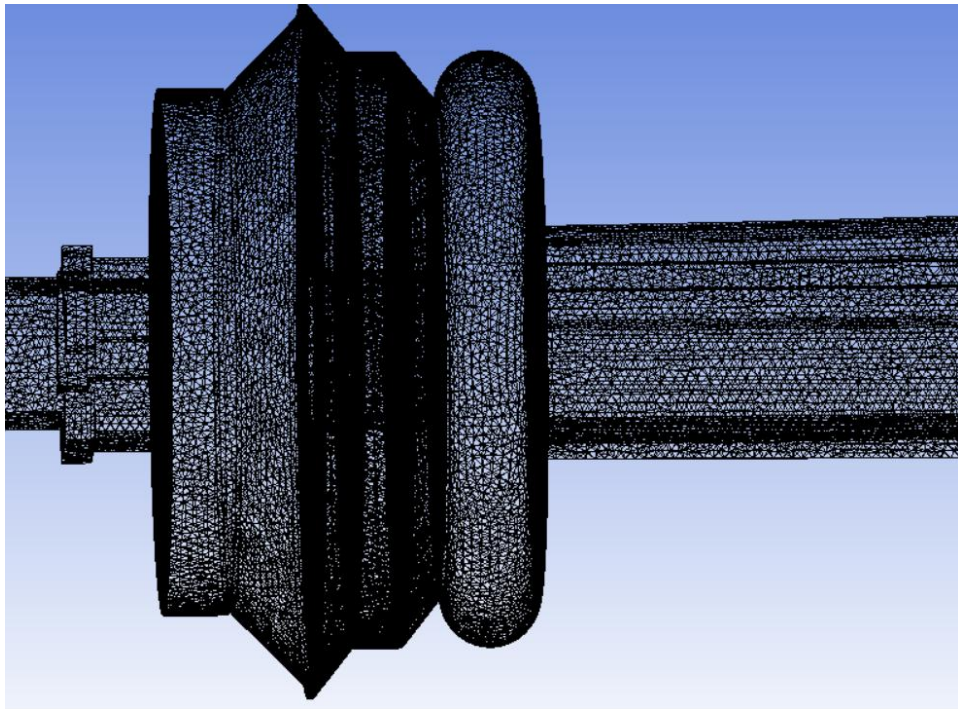


Figura 6.1.2.2.1. Detall de la malla d'elements de mida 1 m, la malla més fina

Mallat	Mida element	Núm.elements
1	2m	333.052
2	1,5m	769.247
3	1m	2.519.740

Taula 6.1.2.2.1 Número d'elements de cada

Just després de fer el mallat, cal inserir la condició de contorn dins de l'apartat "Modal". En aquest cas, un "Fixed Suport" a la base de la torre, ja que està fixada al sòl (veure figures 6.1.2.1.2 i 6.1.2.1.3)

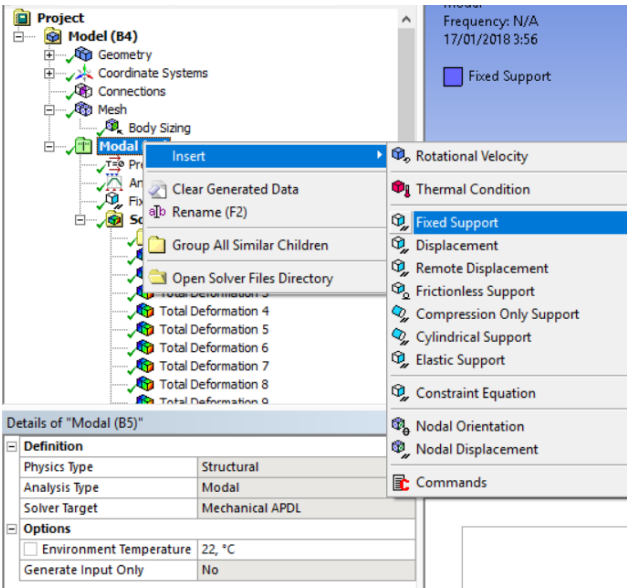


Figura 6.1.2.2.2. Inserir condició de contorn

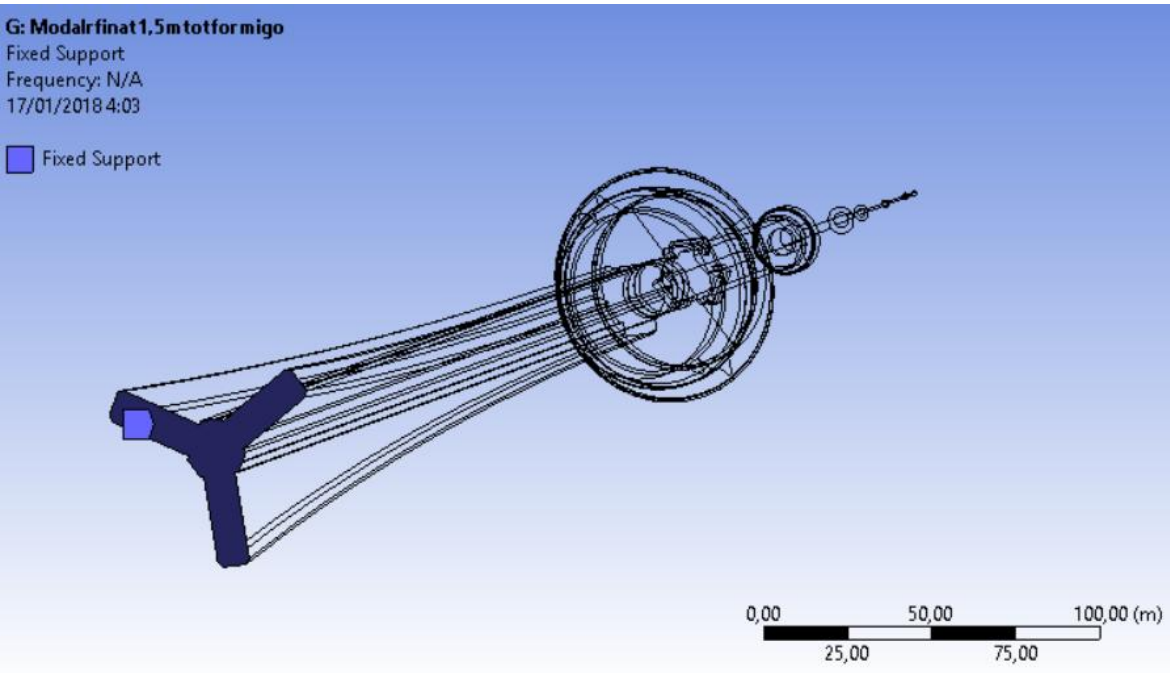


Figura 6.1.2.2.3. Inserir condició de contorn, base de la torre

S'ha procedit al càlcul de freqüències pròpies tal com està indicat en el darrer capítol de la memòria. S'ha començat fent simulacions d'elements de mida gran (ja que impliquen un temps de càlcul menor) i s'ha anat disminuint la mida (major temps de càlcul) fins a la mida de 1 m, ja que les diferències eren tan petites en comparació amb els valors anteriors que no es justifica disminuir-los més: en general els resultats convergien a partir del tercer mallat, que és el d'elements de 1 m. Els resultats obtinguts es mostren al punt següent, 6.1.3.

A l'hora de visualitzar resultats de les freqüències pròpies obtingudes per tractar-los aquests es troben en una taula a la part inferior dreta de la pantalla principal (figura 6.1.2.3.1).

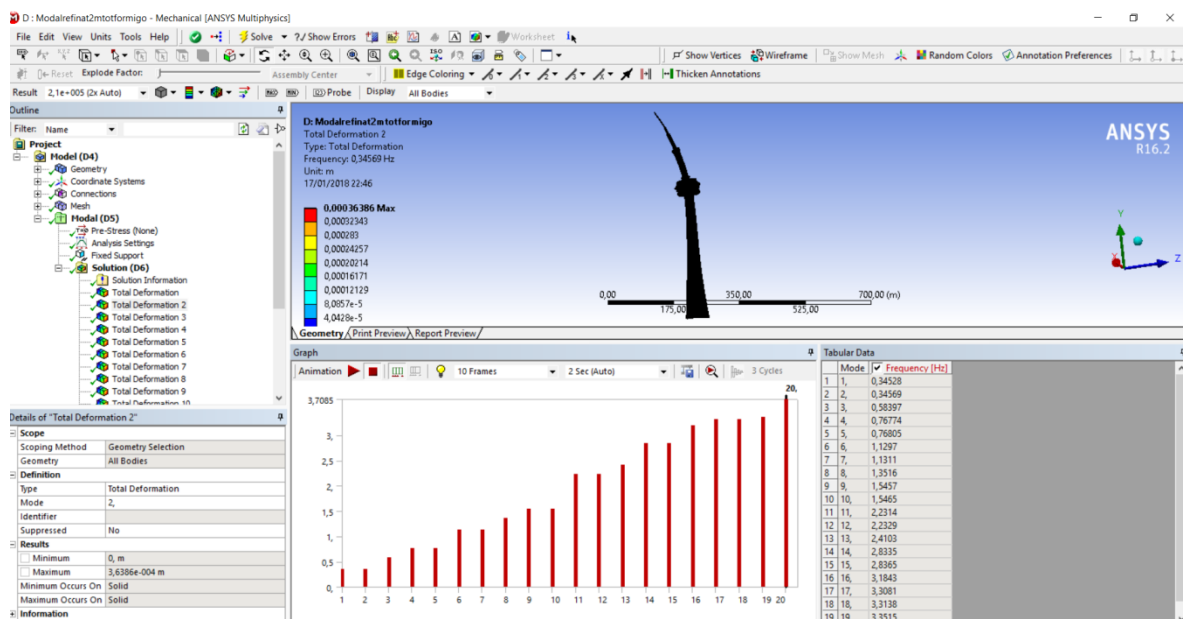


Figura 6.1.2.3.1. Resultats del Modal Analysis

A cada mallat (1r, 2n i 3r per separat) hi ha les diferents freqüències trobades en l'eix vertical. La línia del mateix color en direcció horitzontal mesura la tendència dels diferents mallats (les petites variacions trobades per una mateixa freqüència).

Pel cas de 3 materials diferents (formigó armat amb cables, acer estructural i acer de l'antena, figura 6.1.2.3.2) s'identifiquen freqüències del mateix mode vibratori entre mallat perquè el símbol del marcador és el mateix, per exemple, un triangle en el mode 2 per tots els mallats. No es representen totes les freqüències ja que les variacions d'alguns modes segons el mallat són en el 4t decimal i resultaria molt difícil de representar en una mateixa gràfica. Aquestes variacions petites es poden observar en la taula de resultats. De fet, en la gràfica les línies secundàries representen una variació de tan sols 0,04 Hz.

En el cas de les freqüències més altes no es pot saber si amb elements més petits hagués estat millor o hagués convergit ja en el tercer mallat, però degut a que la resta de freqüències baixes i mitjanes ja convergien i que fer elements més petits posava en risc la simulació (falta de memòria RAM) es considera el darrer mallat com a vàlid amb les freqüències que dona. En tot cas, cal tenir en compte aquest fet, que les freqüències més altes potser no siguin del tot correctes ja que no es pot saber si hi ha convergència sense fer una nova malla, tot i que s'intueix.

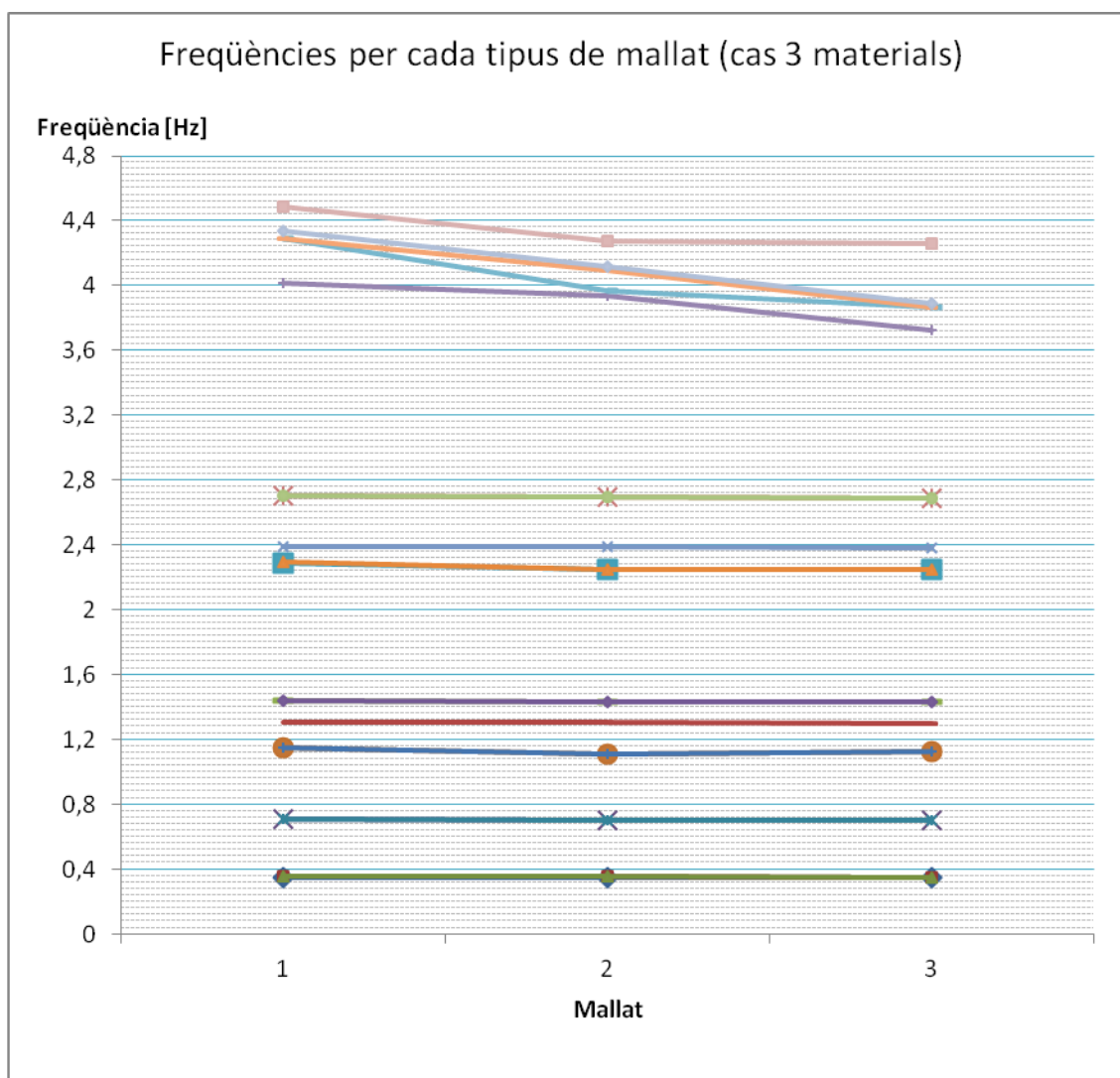


Figura 6.1.2.3.2. Evolució de les freqüències pròpies per cada mallat (cas 3 materials)

En la gràfica corresponent al cas de dos materials diferents (formigó armat amb cables i l'acer de l'antena, figura 6.1.2.3.3) s'observa un fenomen molt similar pel que fa a la convergència i es dona com a vàlid el tercer mallat, tot i que en les freqüències altes s'hauria de continuar simulant amb elements més petits sempre que l'ordinador ho permeti.

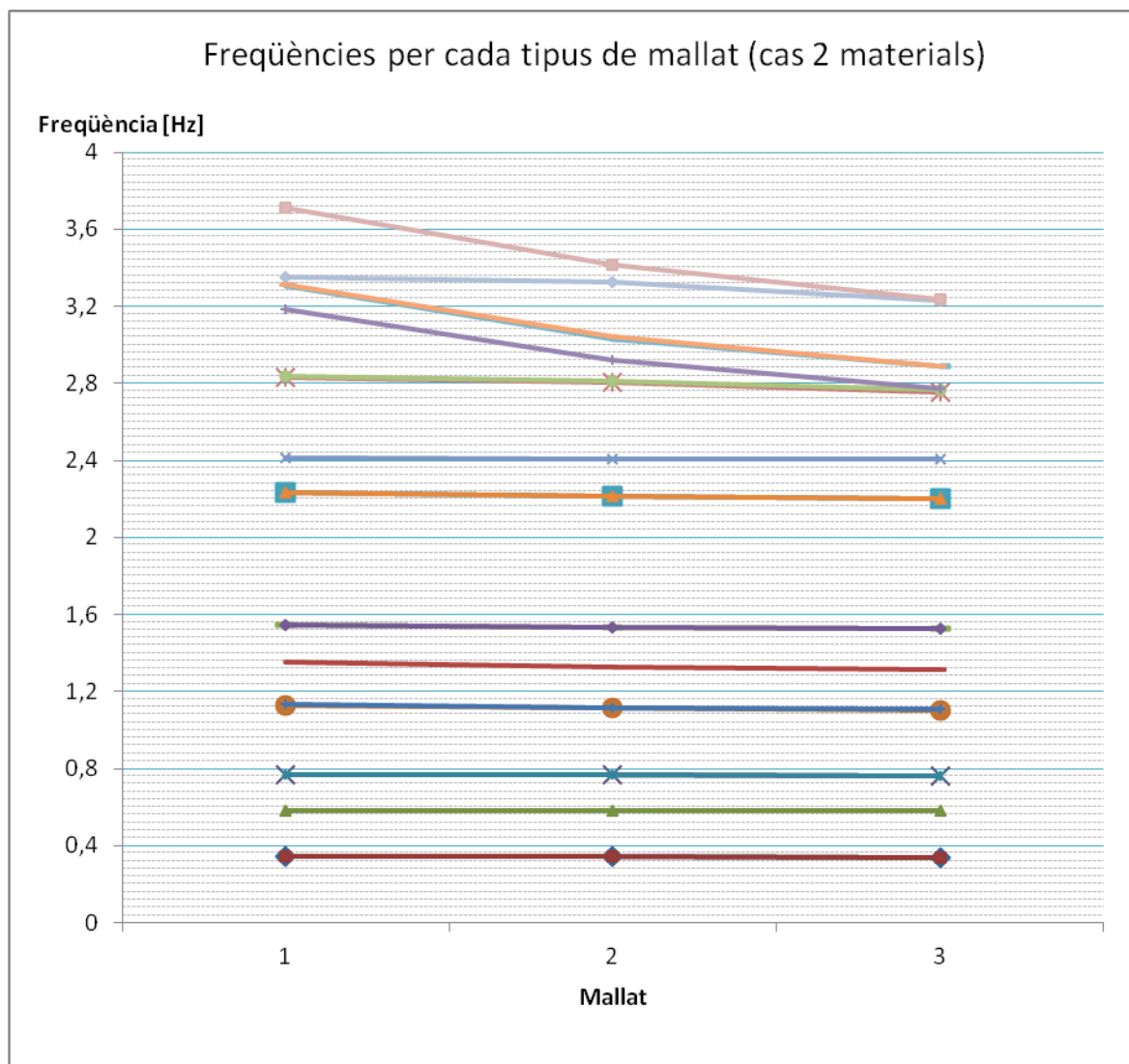


Figura 6.1.2.3.3. Evolució de les freqüències pròpies per cada mallat (cas 2 materials)

6.1.3. Resultats de les dues hipòtesis

6.1.3.1. Hipòtesi tres materials

A continuació es mostra una taula de totes les freqüències pròpies trobades pes diferents mallats pel cas de tres materials diferents, taula 6.1.3.1.1. Representen les freqüències representades en les gràfiques del punt 6.1.2.

	Mode	Mallat		
		1 (2 m)	2 (2,5 m)	3 (1 m)
Freqs. [Hz]	1	0,34797	0,34797	0,34722
	2	0,35615	0,35595	0,35214
	3	0,35655	0,35635	0,35267
	4	0,70662	0,7056	0,70241
	5	0,70695	0,70593	0,70287
	6	1,1494	1,1276	1,1243
	7	1,1509	1,129	1,1257
	8	1,3096	1,3096	1,2977
	9	1,4409	1,4357	1,4311
	10	1,4413	1,4361	1,4314
	11	2,2901	2,2748	2,2453
	12	2,2928	2,2776	2,2485
	13	2,3883	2,3883	2,3842
	14	2,706	2,7022	2,6873
	15	2,7069	2,7031	2,6883
	16	4,0132	4,0131	3,7255
	17	4,2913	4,2886	3,8652
	18	4,2927	4,2899	3,8684
	19	4,3336	4,3336	3,8909
	20	4,488	4,4871	4,2589

Figura 6.1.3.1.1. Freqüències pròpies per cada mallat (cas 3 materials)

6.1.3.2. Hipòtesi dos materials

A continuació es mostra una taula de totes les freqüències pròpies trobades pes diferents mallats pel cas de tres materials diferents, taula 6.1.3.2.1. Representen les freqüències representades en les gràfiques del punt 6.1.2.

	Mode	Mallat		
		1 (2 m)	2 (2,5 m)	3 (1 m)
Freqs. [Hz]	1	0,34528	0,34236	0,33967
	2	0,34569	0,34288	0,34016
	3	0,58397	0,58336	0,58266
	4	0,76774	0,76524	0,76318
	5	0,76805	0,76561	0,76353
	6	1,1297	1,1119	1,1048
	7	1,1311	1,1133	1,106
	8	1,3516	1,3299	1,3112
	9	1,5457	1,5336	1,5273
	10	1,5465	1,5342	1,5279
	11	2,2314	2,2134	2,2005
	12	2,2329	2,215	2,202
	13	2,4103	2,4082	2,4058
	14	2,8335	2,8072	2,7504
	15	2,8365	2,8104	2,7674
	16	3,1843	2,9205	2,7712
	17	3,3081	3,0318	2,8874
	18	3,3138	3,0458	2,8889
	19	3,3515	3,3266	3,2316
	20	3,7085	3,4155	3,2351

Figura 6.1.3..2.1. Freqüències pròpies per cada mallat (cas 2 materials)

6.1.3.3. Comparativa amb la literatura

Si es comparen els resultats obtinguts del mallat més fi amb els de l'informe *CN Tower, Toronto: model and full scale response to wind* (Isyumov, 1984) [21] es poden observar diferents aspectes: taules 6.1.3.3.1 (cas tres materials diferents) i 6.1.3.3.2 (cas dos materials diferents).

Pel que fa a l'estudi de tres materials diferents que conformen la torre, d'una banda, el primer mode no ha estat possible trobar-lo, però d'una altra, se n'han trobat més. Cal tenir en compte que el número de mode que apareix en Ansys no necessàriament es correspon amb el mode de l'informe, ja que es poden trobar modes intermedis. Per tant, el que es fa es comparar les freqüències trobades computacionalment amb les dades experimentals de l'informe de 1984. Aquestes darreres dades han estat obtingudes a partir de les dades experimentals a la base de l'antena de 1974, i d'estimacions obtingudes a partir de mesures en altres punts de la mateixa. A l'informe també hi ha resultats de les freqüències pròpies trobades analíticament el 1974, que varien en la segona o tercera xifra significativa respecte les darreres (figura 6.1.3.3.1)

FREQUENCIES OF MODES OF VIBRATION OF TOWER			
Mode of Vibration	Analytical Estimate (1)	Measurements Near Completion ⁽²⁾	From Current Tower Data
1	.124	.129	.127
2	.266	.305	.298
3	.486	-	.483
4	.815	.838	.815
5	1.03	1.07	1.02
6	1.83	-	1.78
7	2.02	-	2.03

(1) Based on final projected tower properties in 1974.
(2) Taken on November 25, 1976 near base of antenna.

Figura 6.1.3.3.1. Dades de l'informe de la CN Tower de Toronto. Font: [21]

Per altra banda, s'han calculat els errors comesos entre els resultats de l'informe i les freqüències trobades analíticament més semblants. Aquests van del 10,2 al 26,9%.

Freqs [Hz]	Mode	Mallat 3 (1 m)	Resultats experimentals de 1976	Mode	Error relatiu (%)
			0,127	1	
	1	0,34722	0,298	2	16,52
	2	0,35214			
	3	0,35267	0,483	3	26,98
	4	0,70241			
	5	0,70695	0,815	4	13,76
	6	1,1243	1,02	5	10,23
	7	1,1257			
	8	1,2977			
	9	1,4311			
	10	1,4314	1,78	6	19,58
	11	2,2453	2,03	7	10,61
	12	2,2485			
	13	2,3842			
	14	2,6873			
	15	2,6883			
	16	3,7255			
	17	3,8652			
	18	3,8684			
	19	3,8909			
	20	4,2589			

Figura 6.1.3.3.1. Comparativa de resultats Ansys amb reals (cas 3 materials)

Pel que fa a l'estudi de dos materials diferents que conformen la torre, d'una banda, el primer mode no ha estat possible trobar-lo, però d'altra, se n'han trobat més. Cal tenir en compte que el número de mode que apareix en Ansys no necessàriament es correspon amb el mode de l'informe, ja que es poden trobar modes intermedis.

Per altra banda, s'han calculat els errors comesos entre els resultats de l'informe i les freqüències trobades analíticament més semblants. Aquests van del 6,3 al 20,6%.

Freqs [Hz]	Mode	Mallat 3 (1 m)	Resultats experimentals de 1976	Mode	Error relatiu (%)
			0,127	1	
	1	0,33967	0,298	2	13,76
	2	0,34016			
	3	0,58266	0,483	3	20,63
	4	0,76318			
	5	0,76353	0,815	4	6,32
	6	1,1048	1,02	5	8,31
	7	1,106			
	8	1,3112			
	9	1,5273			
	10	1,5279	1,78	6	14,16
	11	2,2005	2,03	7	8,40
	12	2,202			
	13	2,4058			
	14	2,7504			
	15	2,7674			
	16	2,7712			
	17	2,8874			
	18	2,8889			
	19	3,2316			
	20	3,2351			

Figura 6.1.3.3.2. Comparativa de resultats Ansys amb reals (cas 2 materials)

Comparant ambdós simulacions, a nivell de concordança amb les dades de l'informe, són més fidedignes les de la suposició d'un sol tipus de material uniforme en tota la torre en comptes de l'antena, cometent un error molt més baix, per sota del 10% en tres casos.

Els errors són deguts al fet que la torre s'ha modelat a partir de moltes mesures extrapolades de fotografies o plànols en que apareixien només algunes mesures, i que no se sap exactament la composició de cada material (en aquest cas, s'han obviat l'acer estructural), que són hipòtesis que ja es plantejaven des del principi del treball, pensant en l'abast d'aquest. També podria haver influït que el mallat no fos prou fi, però s'ha observat que les freqüències que potser encara no haurien convergit encara en aquesta mida d'elements no han comès un error més gran que d'altres, per tant es conclou que no pot ser l'error principal.

6.1.4. Modes de vibració

6.1.4.1. Vistes

Com que la torre és molt elevada, per tal de veure bé com es mou, es mostren dues captures de pantalla utilitzant com a eixos la base vectorial XYZ i les seves respectives les vistes de la torre (figura 6.1.4.1.1), així com la base vectorial $X'Y'Z'$ on l'eix X' es troba proper a X , entre X i Z , i Y' correspon a Y de l'altra base (figura 6.4.1.1.2).

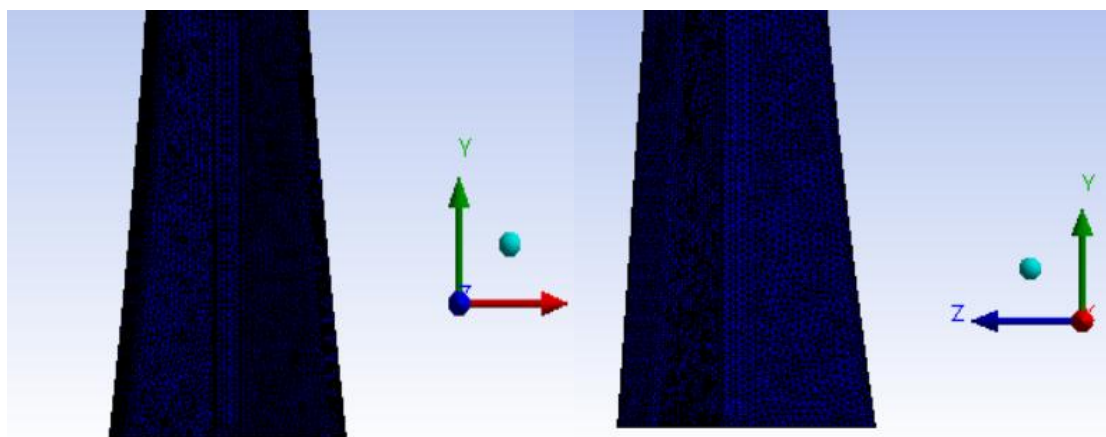


Figura 6.1.4.3.1. Vistes de la torre en la base XYZ

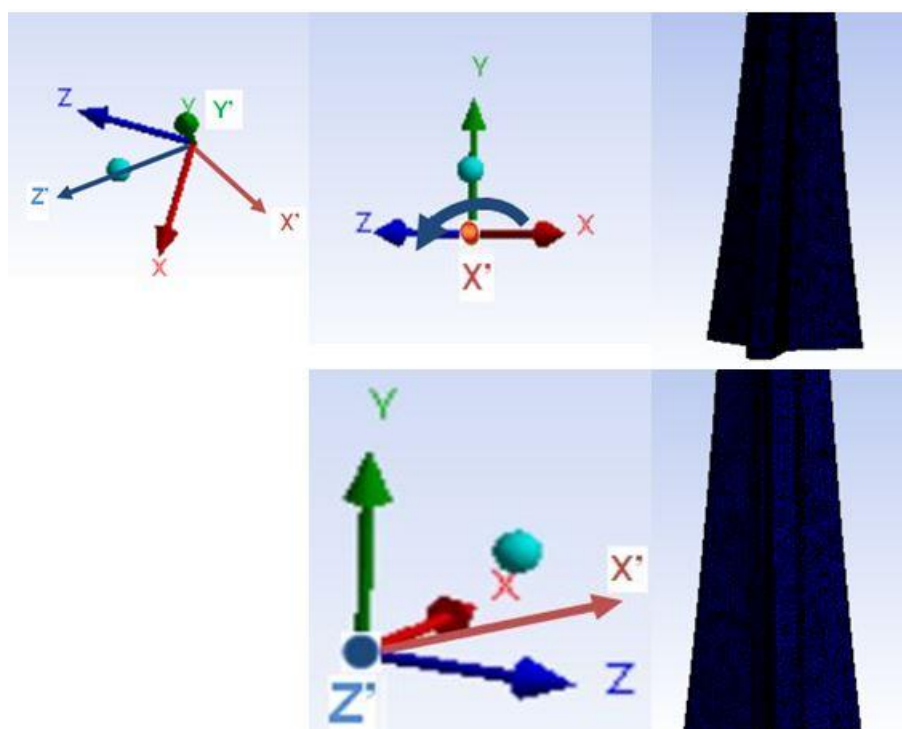


Figura 6.1.4.3.2. Base $X'Y'Z'$ i diferents vistes de la torre segons els seus eixos

6.1.4.2. Descripció dels modes propis pel cas de 2 materials diferents

Tal com s'ha explicat en el capítol 5, cada freqüència pròpia li confereix a l'edifici també una forma de vibrar diferent. Per tant, gràcies a les animacions obtingudes amb Ansys s'observen diferents moviments de l'estructura propis.

El primer mode és una rotació al voltant de l'eix Z' amb un sol node a la meitat de la columna principal. Com és un mode de flexió, se l'anomena també *bending mode* (figura 6.1.4.2.1).

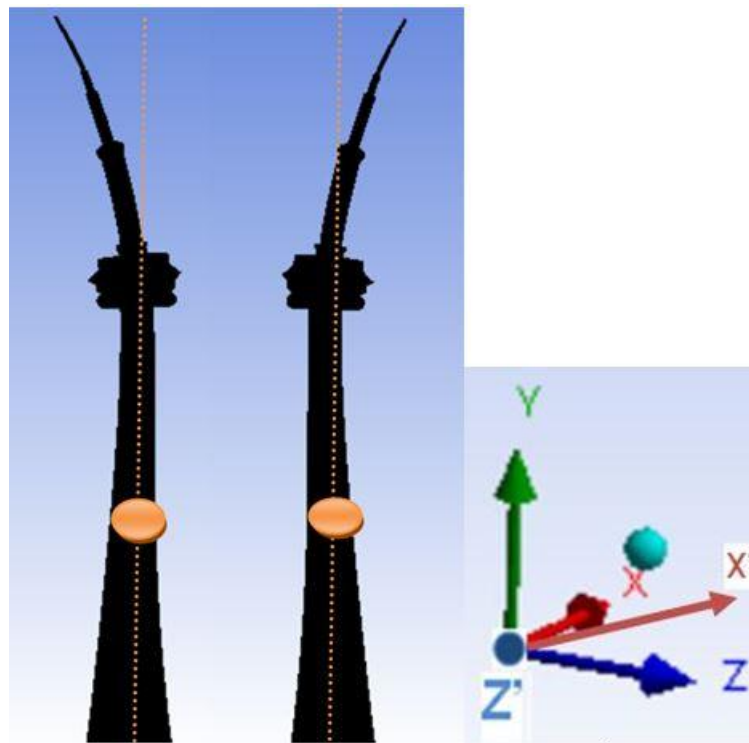


Figura 6.1.4.2.1 Mode 1

El segon mode és una rotació al voltant de l'eix X' amb un sol node, com el mode 1 però girant entorn un altre eix a 90° del del primer (figura 6.1.4.2.2).

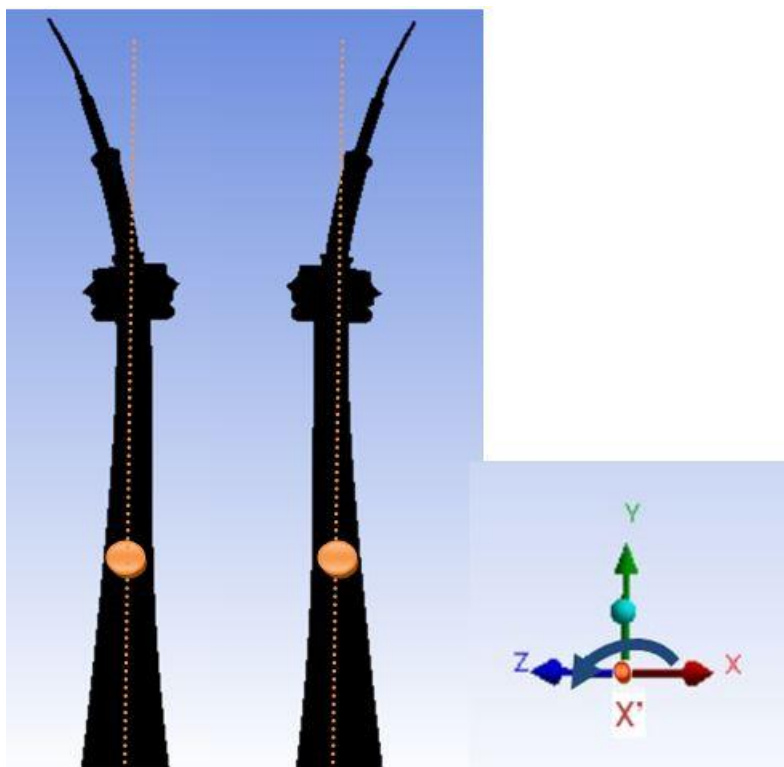


Figura 6.1.4.2.2 Mode 2

El mode 1 i el 2 són iguals, però en diferents direccions. A aquest fenomen se l'anomena doblet.

El tercer mode és torsional. Es tracta d'una torsió sobre el seu eix vertical (figura 6.1.4.2.3).

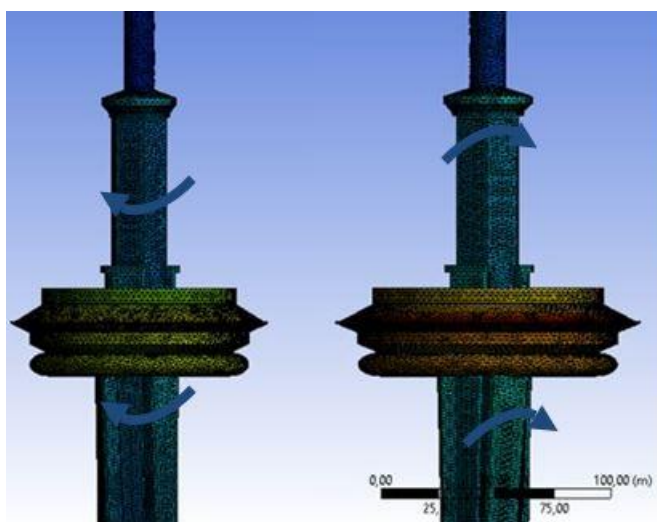


Figura 6.1.4.2.3 Mode 3

El quart mode és una flexió amb dos nodes al voltant de l'eix X' (figura 6.1.4.24).

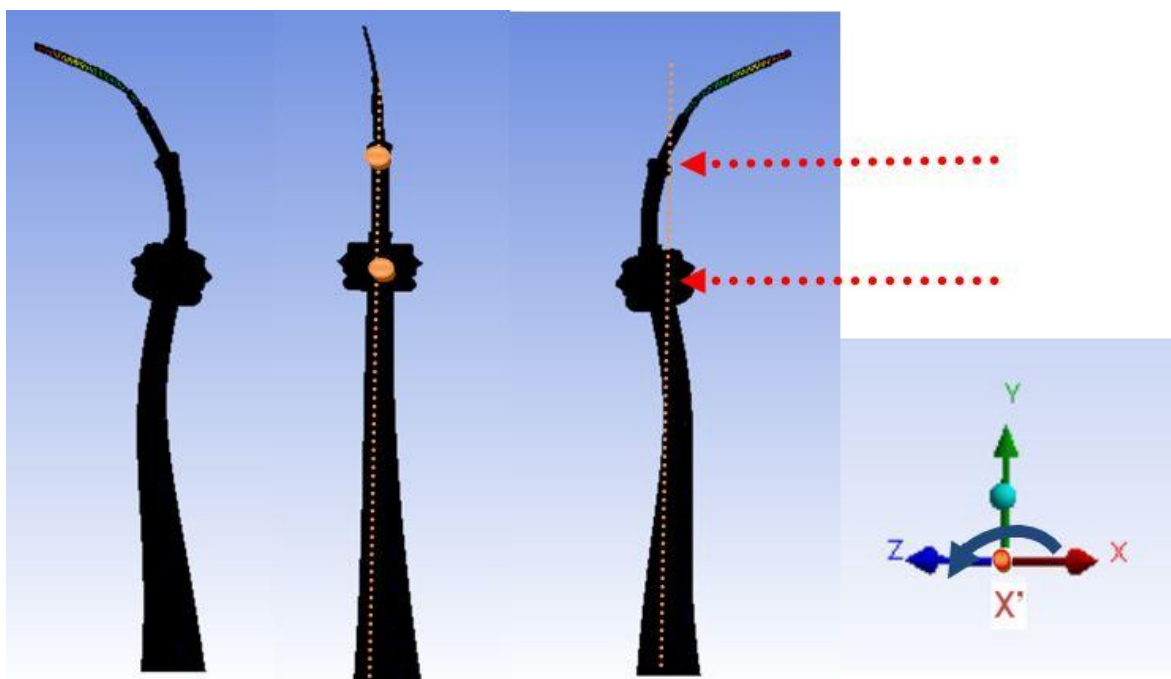


Figura 6.1.4.2.4 Mode 4

El cinquè és el mateix que el quart però més pronunciat (figura 6.1.4.2.5).

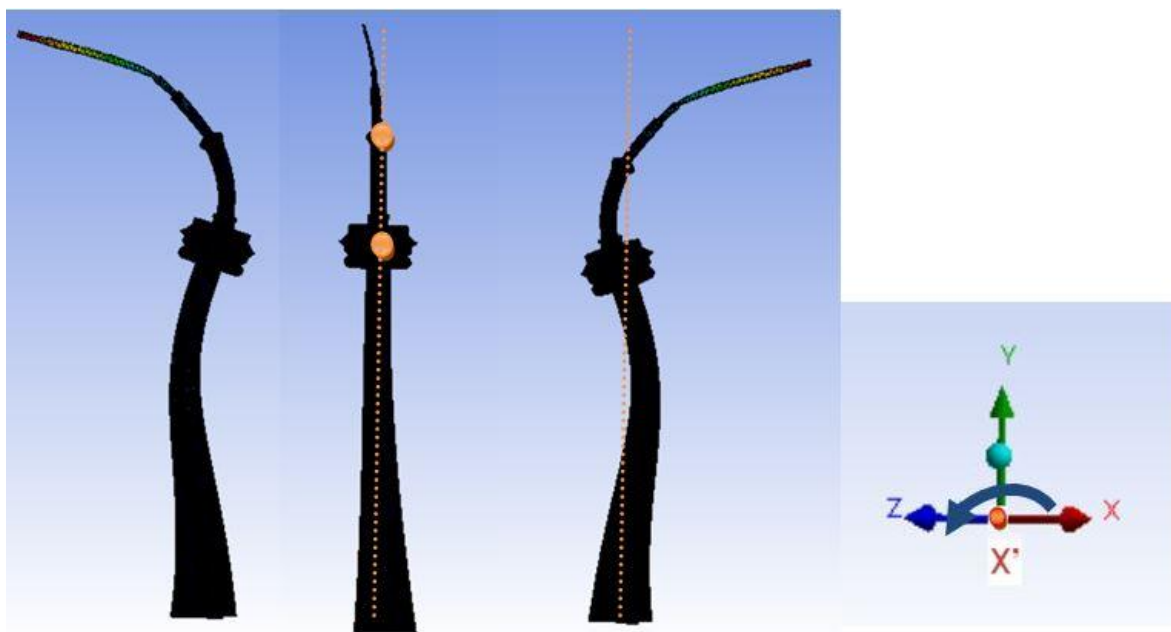


Figura 6.1.4.2.5 Mode 5

El mode 6 es correspon a una oscil·lació al voltant de l'eix X' , però amb un node molt amunt, a l'alçada de l'últim tram de l'antena. Per tant, és un mode local de l'antena (figura 6.1.4.2.6).

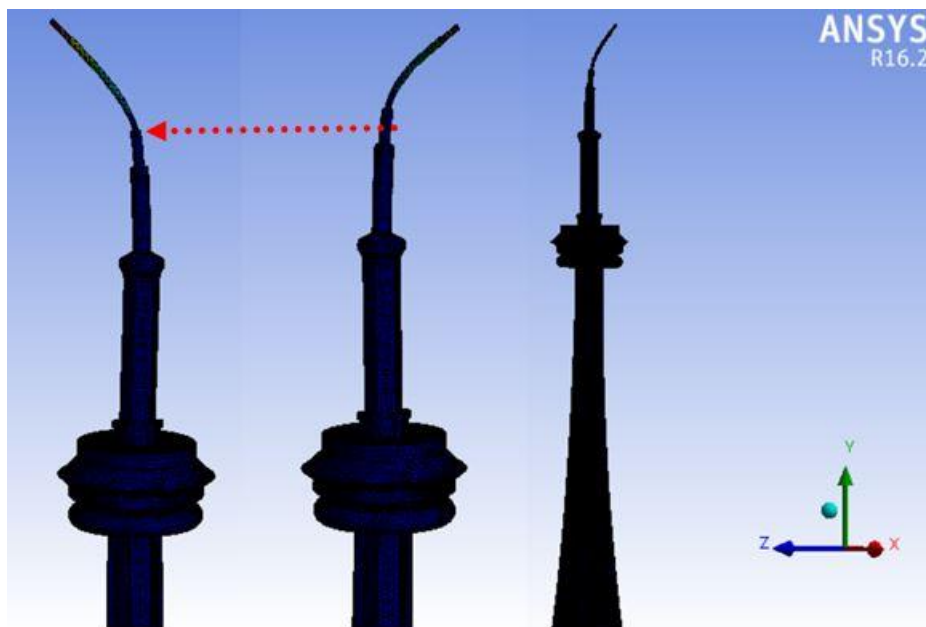


Figura 6.1.4.2.6 Mode 6

El mode 7 es tracta d'una oscil·lació al voltant de l'eix X' amb dos nodes, similar al 4t i 5è node però amb diferent amplitud d'oscil·lació i d'ubicació dels nodes (figura 6.1.4.2.7)..

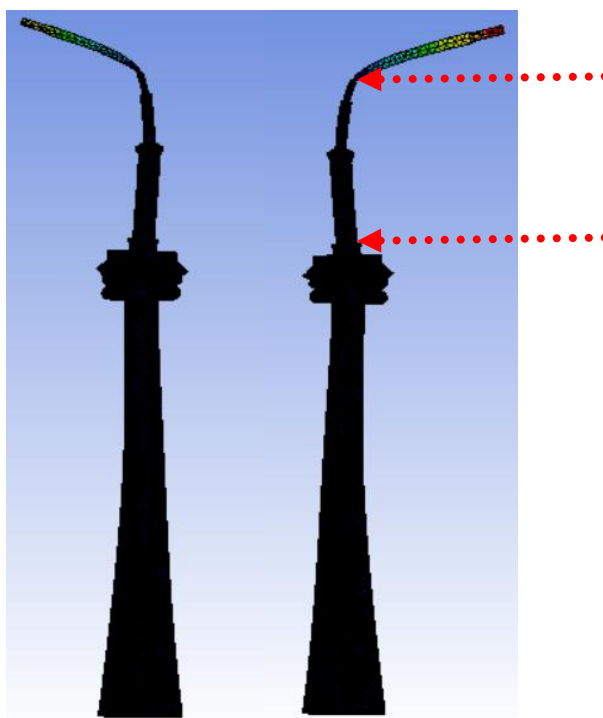


Figura 6.1.4.2.7 Mode 7

El vuitè mode és un moviment de translació al llarg de l'eix vertical (figura 6.1.4.2.8).

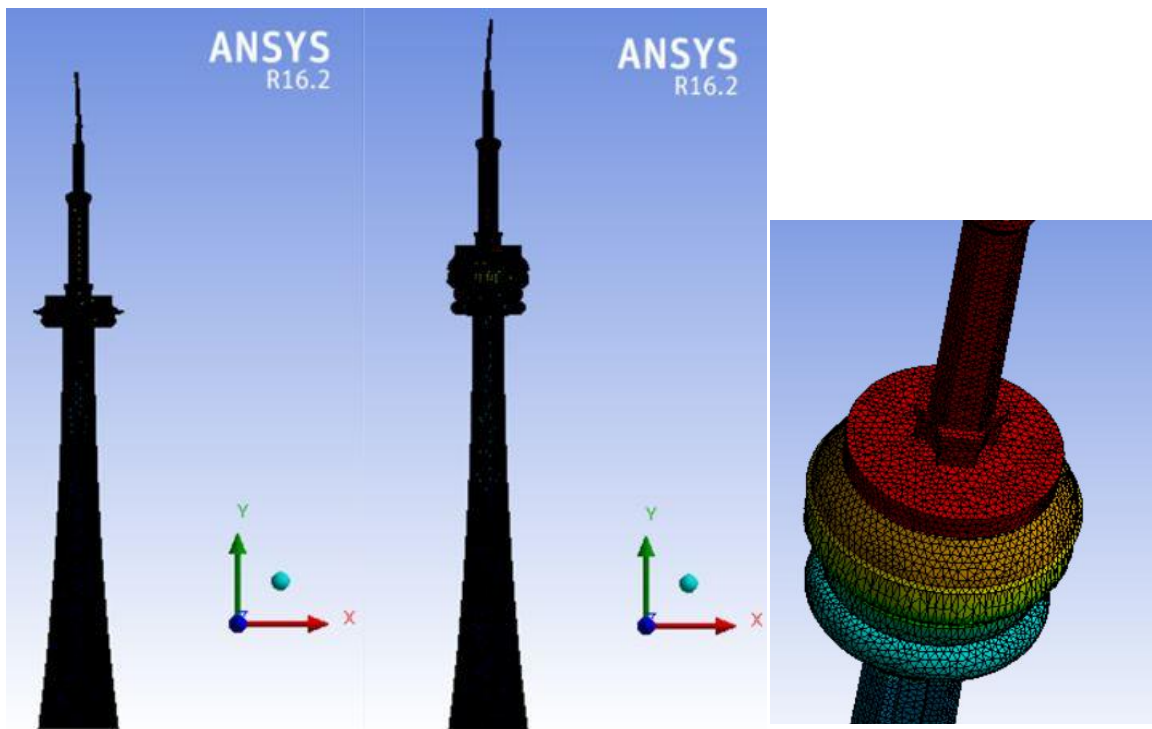


Figura 6.1.4.2.8 Mode 8

El mode nou és un altre bending mode amb 3 nodes aquest cop al voltant de l'eix Z (figura 6.1.4.2.9)

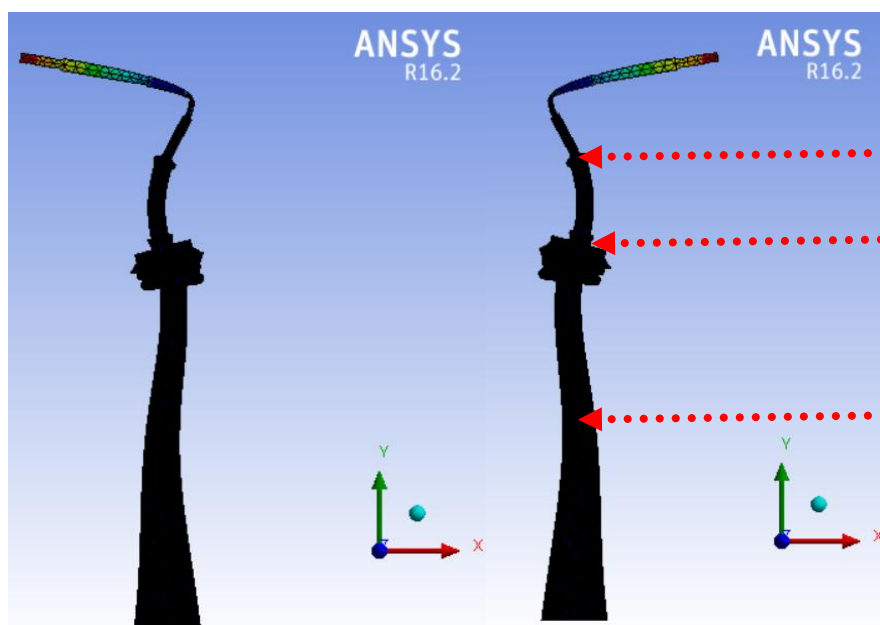


Figura 6.1.4.2.9 Mode 9

El mode deu és com el nou però al voltant de l'eix X (figura 6.1.4.2.10)

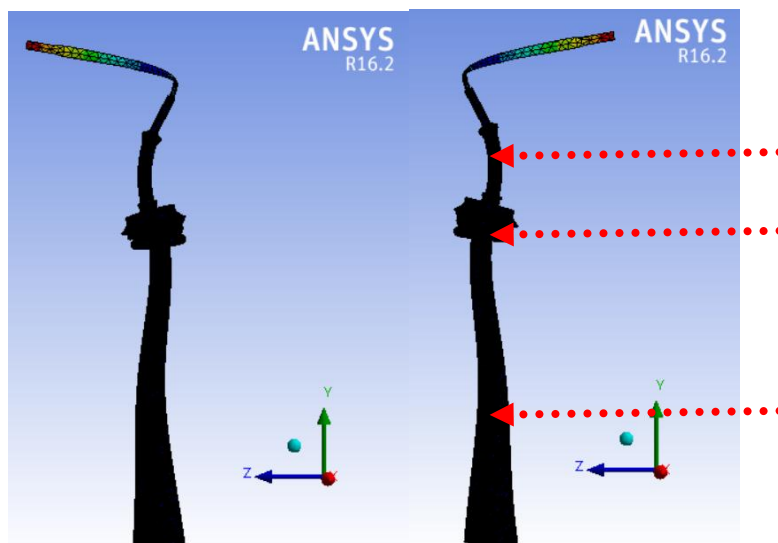


Figura 6.1.4.2.10 Mode 10

El mode 11 és al voltant de l'eix Z, també de dos nodes. Per primer cop el mirador es doblega a l'hora de fer el gir (no obstant s'està veient una exageració de la realitat, i les imatges estan escalades per veure més exagerat el moviment per identificar-lo, figura 6.1.4.2.11).

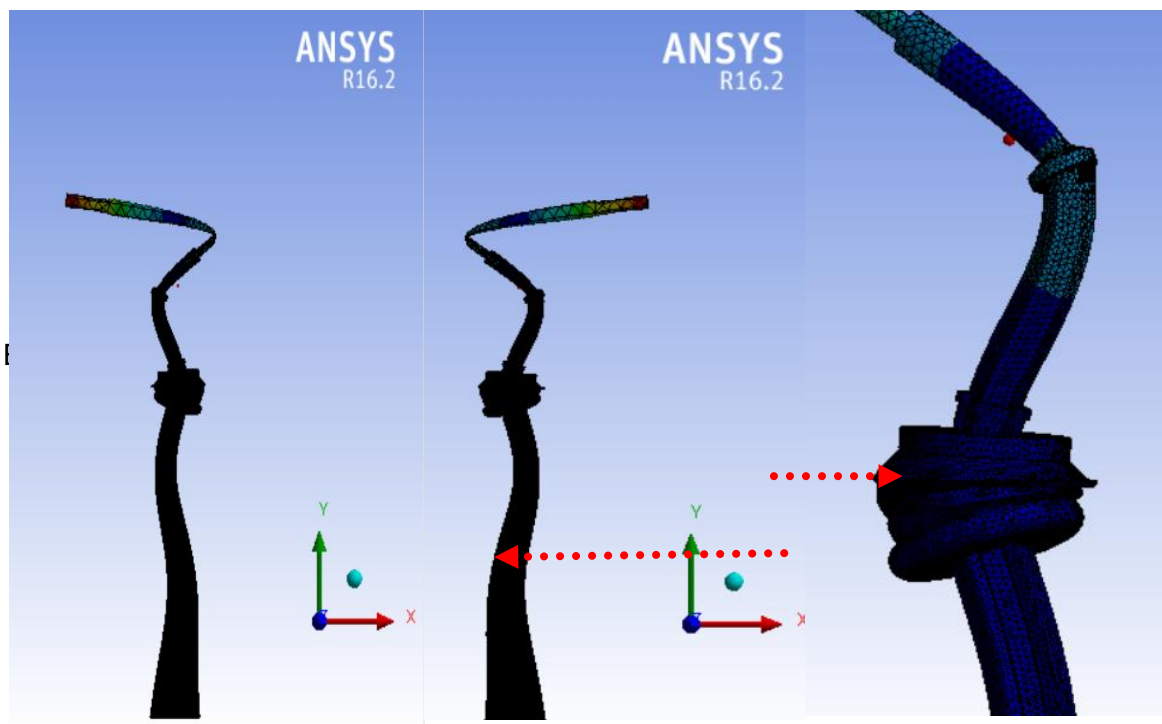


Figura 6.1.4.2.11 Mode 11

El mode 12 és exactament igual que l'11 però en l'eix X' (figura 6.1.4.2.12).

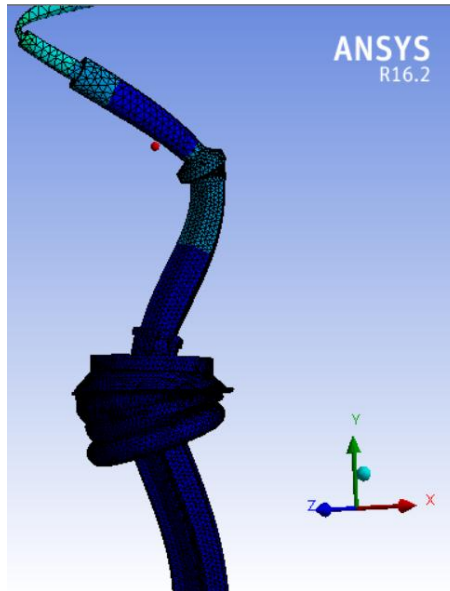


Figura 6.1.4.2.12 Mode 12

El mode 13 és un altre mode torsional com el tercer, però aquest cop la torsió no és de tot el cos a cada banda, sinó que de mirador en avall torça cap a un costat i l'antena ho fa cap en l'altre (figura 6.1.4.2.13).

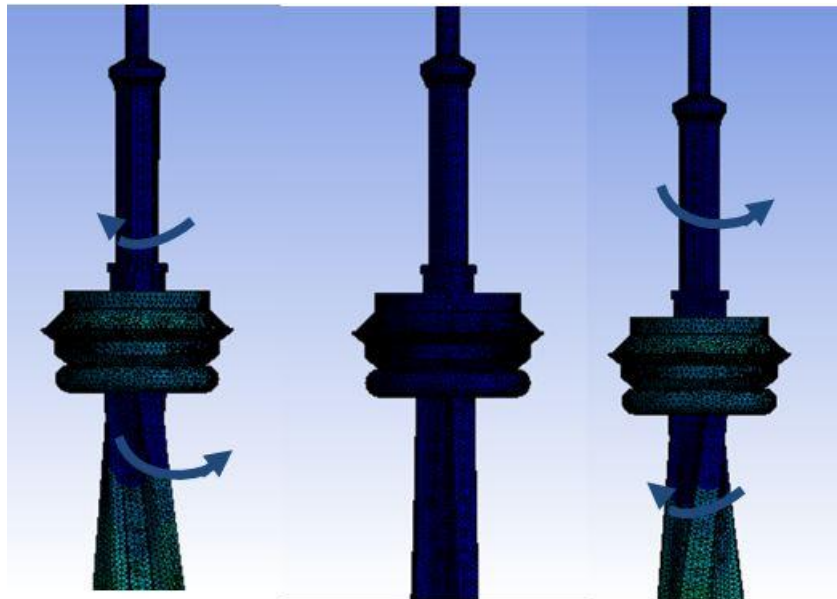


Figura 6.1.4.2.13 Mode 13

El mode 14 és un cas interessant perquè té 4 nodes, un al centre de la torre, un al centre del mirador, i dos a l'antena, on aquest cas la flexió es produeix al voltant de l'eix Z' (figura 6.1.4.2.14).

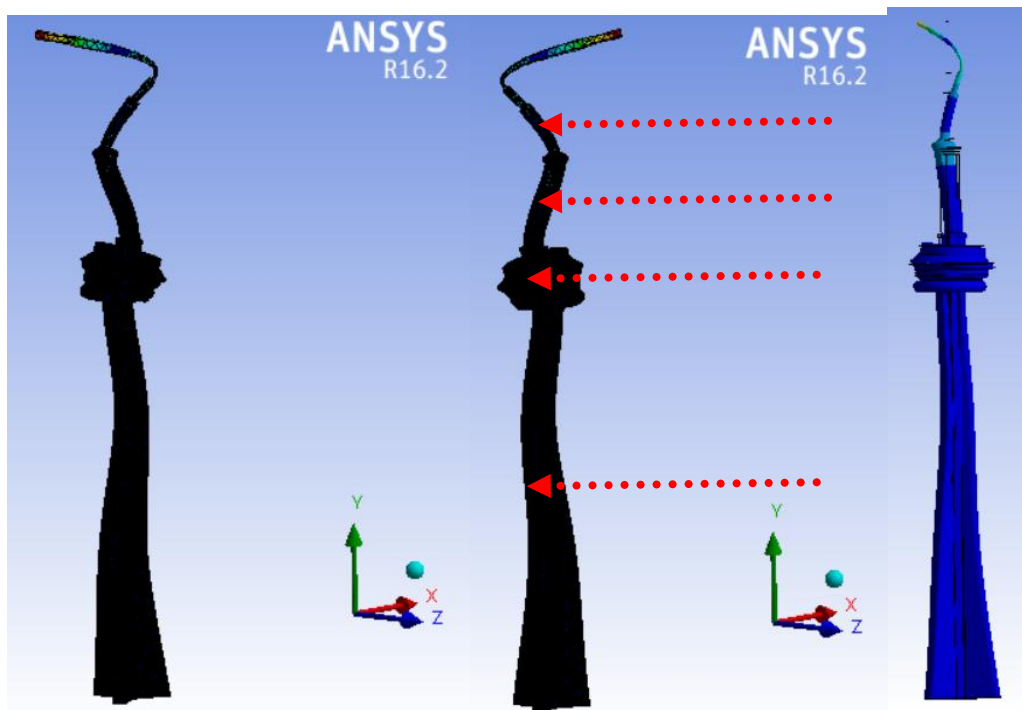


Figura 6.1.4.2.14 Mode 14

El mode 15 és exactament igual que el 14 però en un altre eix, el X' (figura 6.1.4.2.15) .

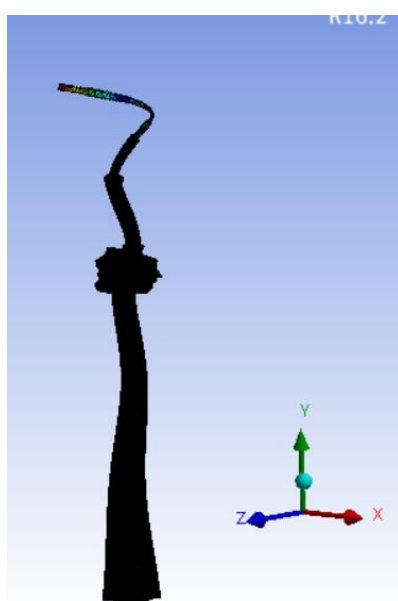


Figura 6.1.4.2.15 Mode 15

El mode 16 és un de translació però que només afecta al mirador (figura 6.1.4.2.16)

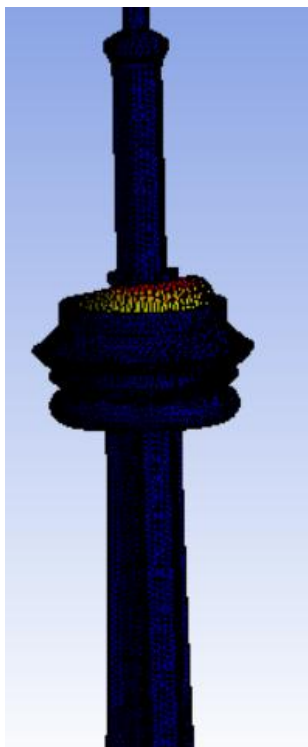


Figura 6.1.4.2.16 Mode 16

El mode 17 és una combinació de translació local en el mirador i flexió local en l'antena amb un node, al voltant de l'eix X' (figura 6.1.4.2.17).

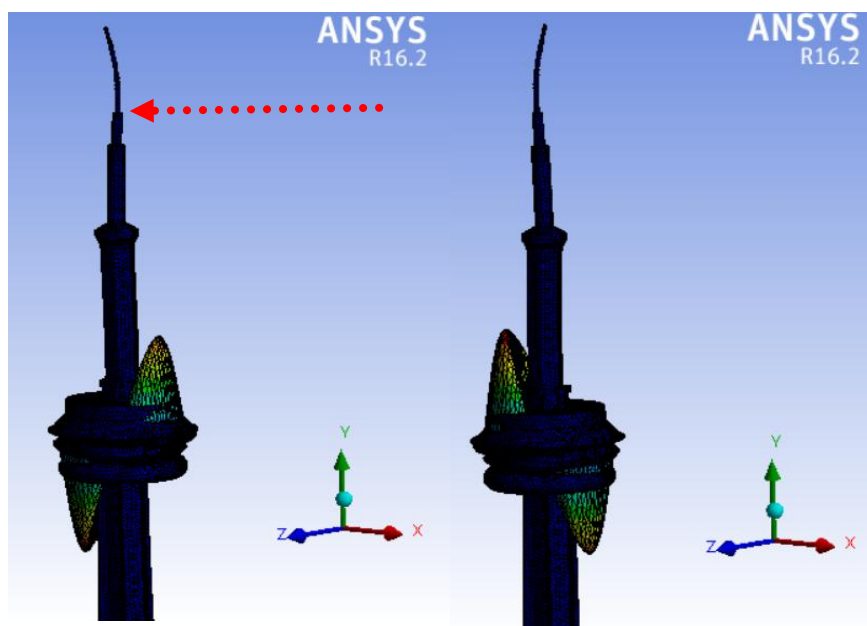


Figura 6.1.4.2.17 Mode 17

El mode 18 i el 20 són de transició local en el mirador.

El mode 19 és de translació, però es diferencia amb el 8è en què de mirador en amunt la translació va cap un sentit i de mirador en avall va per al contrari, fent que en global l'estructura es comprimeixi cada mig cicle i la resta de cicle s'expandeixi (figura 6.1.4.2.18)

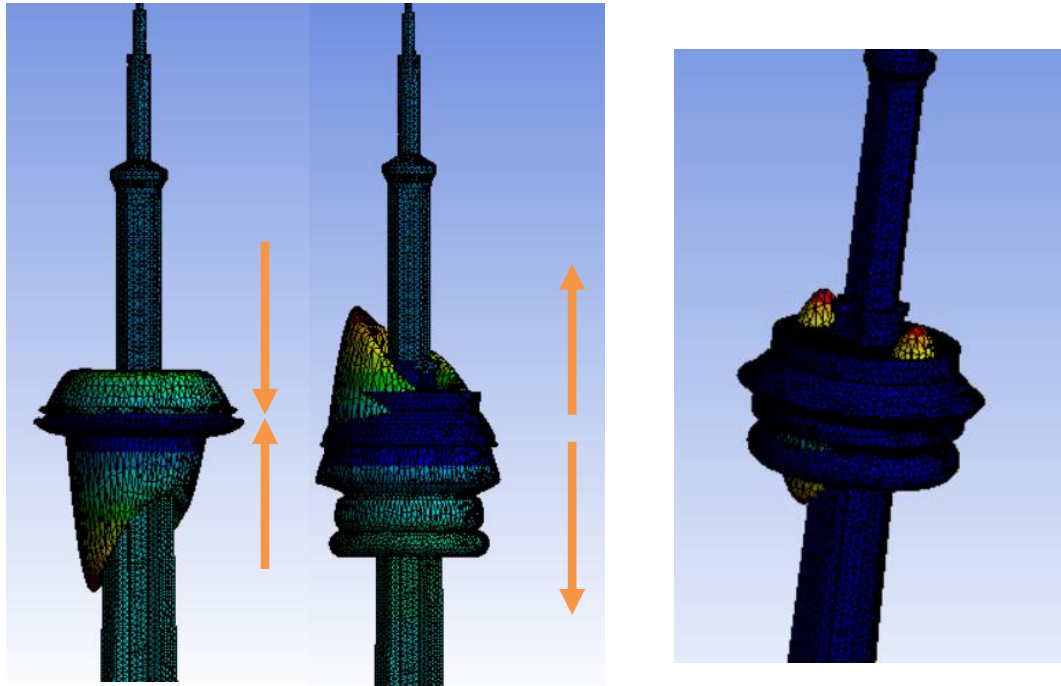

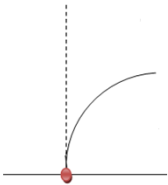


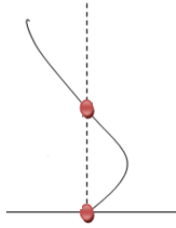

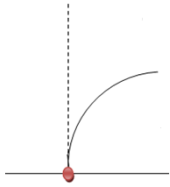
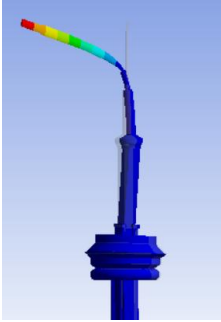


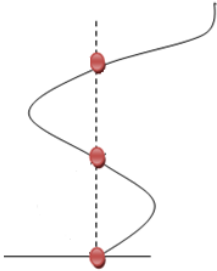



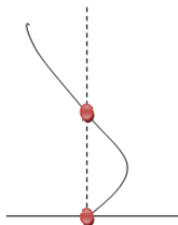
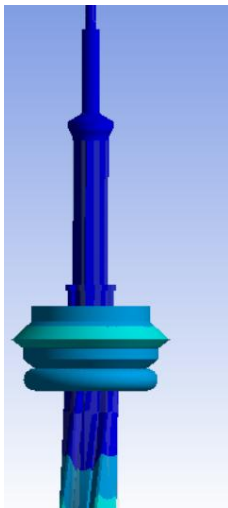
Figura 6.1.4.2.18 Mode 19 i 20è

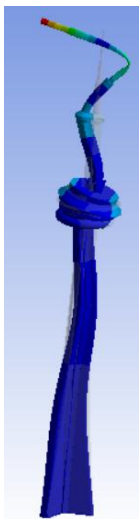
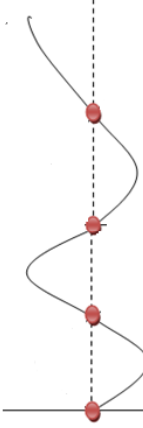
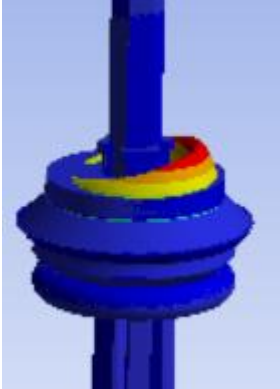

6.1.4.3. Taula resum dels diferents modes

A la taula 6.1.4.3.1 es resumeixen els diferents modes propis de vibrar que té la Torre de Toronto.

Mode	Freqüència	Imatge del Mode	Descripció del mode	Respecte quin eix?	Representació gràfica
1	0,33967		Flexió 1 node	X'	
2	0,34016	Equivalent a 1	Flexió 1 node	Z'	Equivalent a 1
3	0,58266		Torsió	Eix vertical	
4	0,76318		Flexió 2 nodes	X'	
5	0,76353	Equivalent a 4	Flexió 2 nodes	X'	Equivalent a 4

6	1,1048		Flexió 1 node local	X'	
7	1,106		Flexió 2 nodes	X'	Equivalent a 4
8	1,3112		Translació Global	Eix vertical	
9	1,5273		Flexió 3 nodes	Z	

10	1,5279	Equivalent a 9	Flexió 3 nodes	X	Equivalent a 9
11	2,2005		Flexió 2 nodes	Z	
12	2,2005	Equivalent a 11	Flexió 2 nodes	X'	Equivalent a 11
13	2,4058		Torsió (2 rotacions en sentit contrari per sota i per sobre del mirador)	Eix vertical	

14	2,7504		Flexió 4 nodes	Z'	
15	2,7674	Equivalent al 14	Flexió 4 nodes	X'	Equivalent al 14
16	2,7712		Translació local	Eix vertical	
17	2,8874		Translació local+ Flexió local 1 node a l'antena	Flexió en X'	

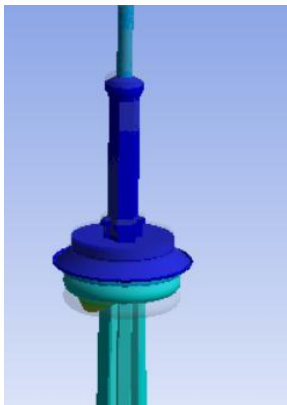
18	2,8889	Equivalent a 16	Translació local	Eix vertical	
19	3,2316		Translació (2 sentits apuntant al mirador o separant-se'n)	Eix vertical	
20	3,2351	Equivalent a 16	Translació local	Eix vertical	

Figura 6.1.4.3.1 Taula resum

6.2. Anàlisi modal de L'Hotel Vela de Barcelona en Ansys Modal

6.2.1. Consideracions prèvies: materials

Com a material utilitzat en l'anàlisi computacional s'ha fet servir el formigó armat deduït en l'apartat d'anàlisi modal de la CN Tower. Tal com es s'ha vist en l'apartat anterior, els cables proporcionalment no afectaven a les propietats del material del *formigó armat*, en comparació amb el material *formigó armat amb cables*. El formigó armat és el principal material utilitzat segons l'informe *La estructura del Hotel Vela de Barcelona* [21]. L'hotel està cobert per finestres de vidre, però el material s'ha considerat menyspreable davant del formigó armat, que conforma quasi la totalitat de l'estructura tal com es pot veure en les següents fotografies (figura 6.2.1.1)



Figura 6.2.1.1. Formigó armat durant la construcció de l'Hotel Vela. Font: *La estructura del Hotel Vela de Barcelona* [21]

6.2.2. Geometria i Mallat

6.2.2.1. Geometria

En aquest cas el sòlid s'importa sencer en format *iges* sense cap operació prèvia.

6.2.2.2. Mallat

A la figura 6.2.2.2.1 es pot veure un detall de la malla i a la taula 6.2.2.1 el número d'elements de cada simulació.

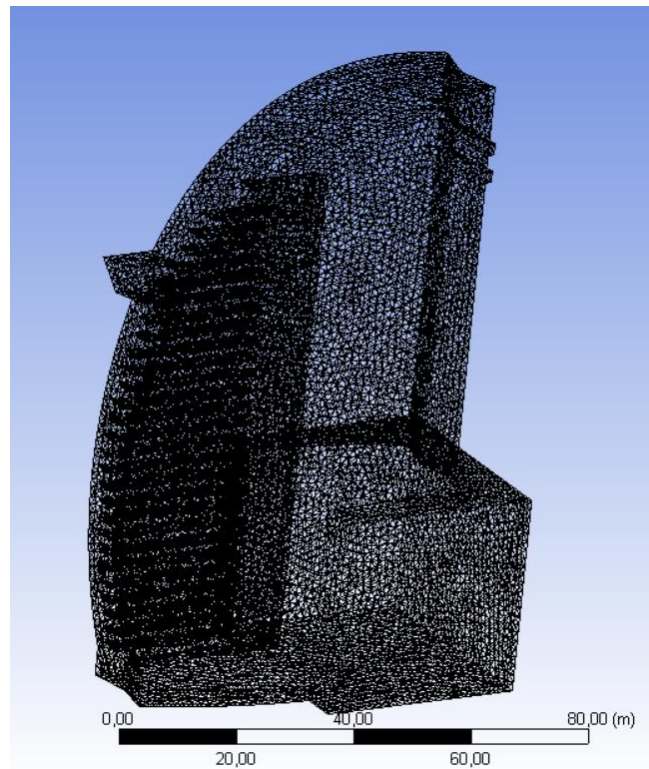


Figura 6.2.2.2.1. Detall de la malla d'elements de mida 1,5 m

Mallat	Mida element	Núm.elements
1	3,5 m	35.168
2	2 m	201.830
3	1,5 m	405.558
4	1 m	1.336.980

Taula 6.2.2.2.1 Número d'elements de cada

De la mateixa manera que s'ha fet amb els altres edificis, es fixa la condició de contorn a la base (figura 6.3.2.2.2).

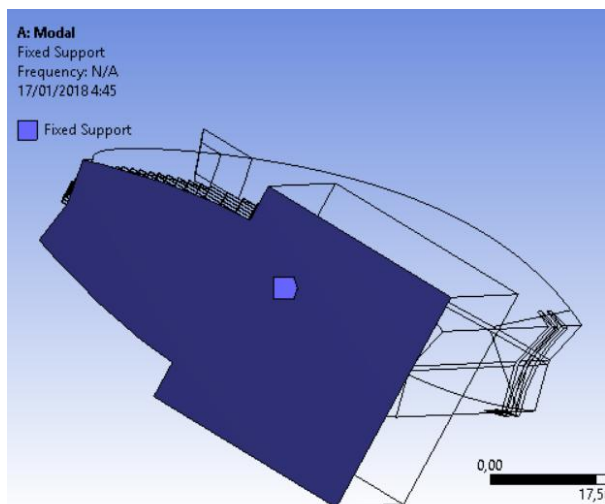


Figura 6.3.2.2.2. Fixació de la condició de contorn a la base

6.2.2.3. Anàlisi de sensibilitat de la malla

S'ha procedit al càlcul de freqüències pròpies tal com està indicat en el darrer capítol de la memòria. S'ha començat fent simulacions d'elements de mida 2 m (ja que impliquen un temps de càlcul menor) i s'ha anat disminuint la mida (major temps de càlcul) fins a la mida de 1m.

A continuació es mostra una captura de pantalla amb les freqüències pròpies ja obtingudes (figura 6.2.2.3.1)

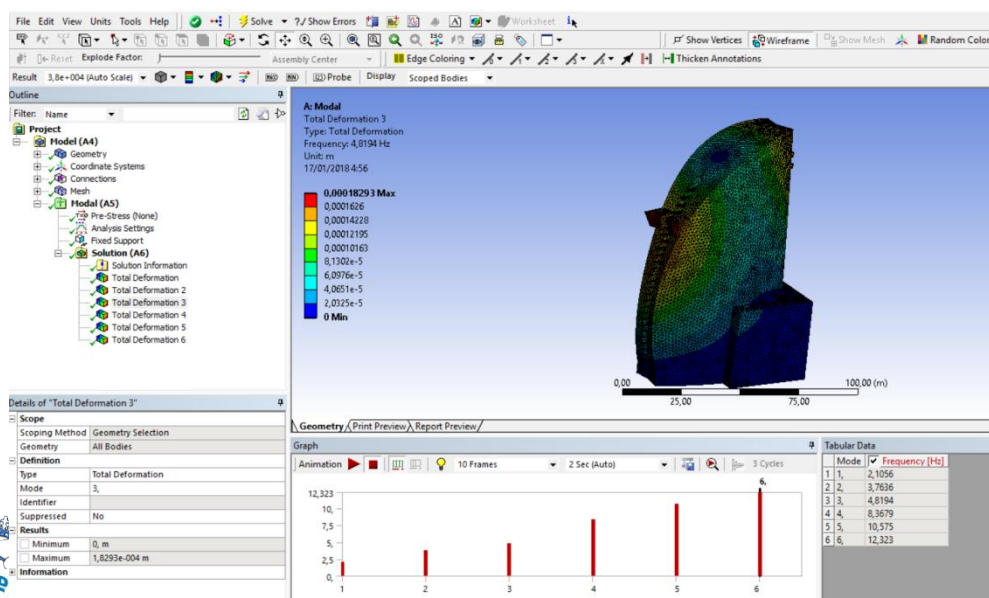


Figura 6.2.2.3.1 Resultats del Modal

A la figura 6.2.2.3.2 es pot veure la gràfica dels diferents mallats, sent el primer el de mida més gran (2m), el 2n el de mida 1,5 m i el tercer el de mida 1,5 m.

A cada mallat (1r, 2n, 3r i 4t per separat) hi ha les diferents freqüències trobades en l'eix vertical. La línia del mateix color en direcció horitzontal mesura la tendència dels diferents mallats (les petites variacions trobades per una mateixa freqüència). S'identifiquen freqüències del mateix mode vibratori entre mallats perquè el símbol del marcador és el mateix, per exemple, un triangle en el mode 2 per tots els mallats.

Es pot comprovar com amb una diferència de mida de reducció a la meitat no hi ha pràcticament diferències entre el 3r i el 4t mallat (cada línia de l'eix secundari de les ordenades correspon a 0,2 Hz) i en tot cas, els resultats convergeixen des del segon. De fet només en la primera i sisena freqüència pròpia trobades hi ha alguna petita diferència en el tercer mallat.

Com que l'edifici supera els 100 metres d'alt no es va considerar agafar una malla d'elements més grans de 3,5 de mida, possiblement si s'haguessin agafat de més grans s'hagués vist que la gràfica no hagués resultat tan convergent des del segon tipus de mida més gran.

En tot cas això denota que tots 3 darrers tipus de mallat són força correctes, sent el darrer més adient ja que en conjunt la tendència és a disminuir els decimals de les freqüències i en el tercer hi ha un petit augment en dos casos respecte el segon mallat; i el segon mallat és d'elements força grans (2m) tot i que per la mida de l'edifici no són tan "grans".

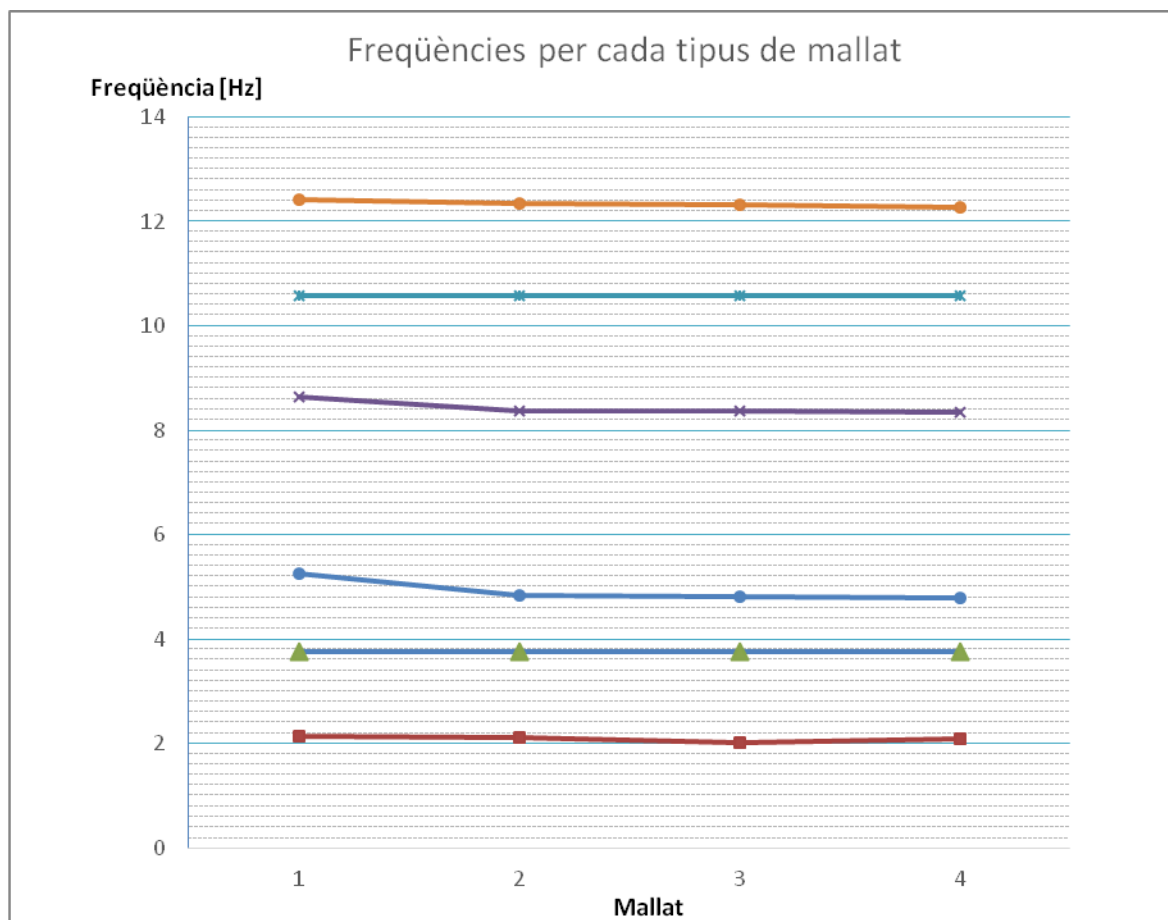


Figura 6.2.2.3.2. Evolució de les freqüències pròpies per cada mallat

6.2.3. Resultats

En comparació amb la CN Tower els modes de vibració de l'hotel Vela són més compactes, ja que no està format per estructures primes i elàstiques com l'antena de la torre. De fet, l'edifici és molt menys esvelt i, per tant, s'esperen resultats de freqüències pròpies bastant més elevats (taula 6.2.2.3.1).

No s'han trobat valors experimentals de les freqüències pròpies de l'Hotel Vela de Barcelona, per tant s'ha fet només un anàlisi computacional.

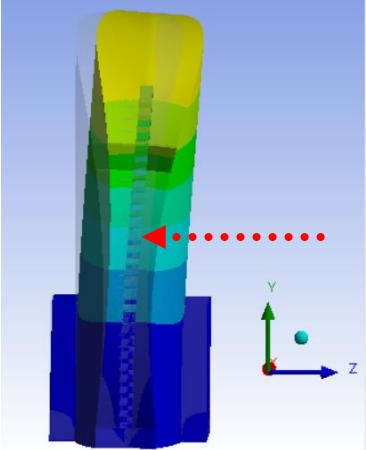
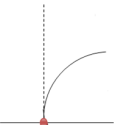
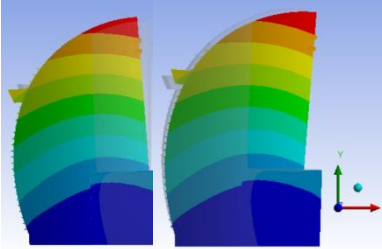
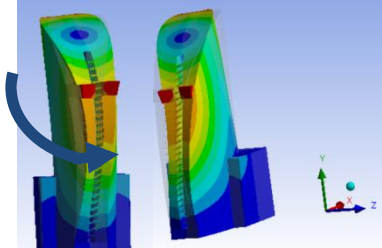
Mida dels elements [m]	Freqüències pròpies [Hz]					
	1	2	3	4	5	6
2	2,108	3,7652	4,8293	8,3756	10,578	12,342
1,5	2,0156	3,7636	4,8194	8,3679	10,575	12,323
1	2,1006	3,7636	4,7833	8,3424	10,572	12,262

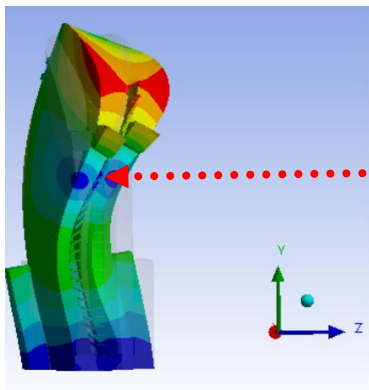
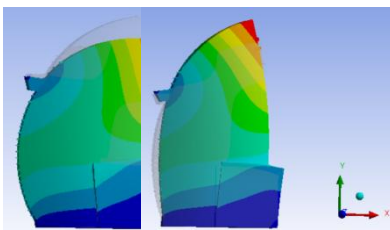
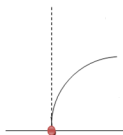
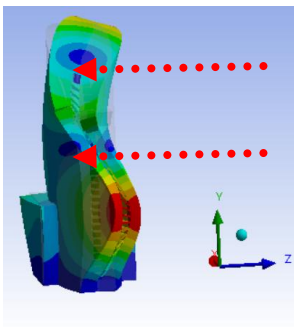
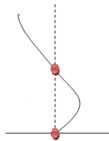
Taula 6.2.2.3.1. Freqüències pròpies per cada mallat

6.2.4. Modes de vibració

6.2.4.1. Taula Resum

Tal com s'ha explicat en el capítol 4, cada freqüència pròpia li confereix a l'edifici també una forma de vibrar diferent. Per tant, gràcies a les animacions obtingudes amb Ansys s'observen diferents moviments de l'estructura propis.

Mode	Freqüència	Imatge del Mode	Descripció del mode	Respecte quin eix?	Rep. gràfica
1	2,1006		Flexió 1 node	X	
2	3,7636		Flexió 1 node (molt poca)	Z	Equivalent a 1
3	4,7833		Torsió global		

4	8,3424		Flexió 1 node	X	
5	10,572		Translació Compressió i estirament alternats de tota l'estructura		
6	12,262		Flexió 2 nodes	X	

6.3. Anàlisi modal de la torre Shanghai World Financial Center (SWFC) en Ansys Modal

6.3.1. Consideracions prèvies: materials

Com a material utilitzat en l'anàlisi computacional s'ha fet servir el formigó armat deduït en l'apartat d'anàlisi modal de la CN Tower. El formigó armat és el principal material utilitzat [23]. L'edifici està cobert per finestres de vidre, però el material s'ha considerat menyspreable davant del formigó armat, que conforma quasi la totalitat de l'estructura com en el cas de l'Hotel Vela, que és superficial (figura 6.3.1.1)



Figura 6.3.1.1 Estructura de formigó armat de la SWFC. Font: [23]

6.3.2. Geometria i Mallat

6.3.2.1. Geometria

S'ha importat el sòlid sencer en format *iges* prèviament activant Units→ *Large Model Support*→*On* per les unitats, ja que la torre fa 493 m d'alçada (veure figura 6.3.2.1.1).

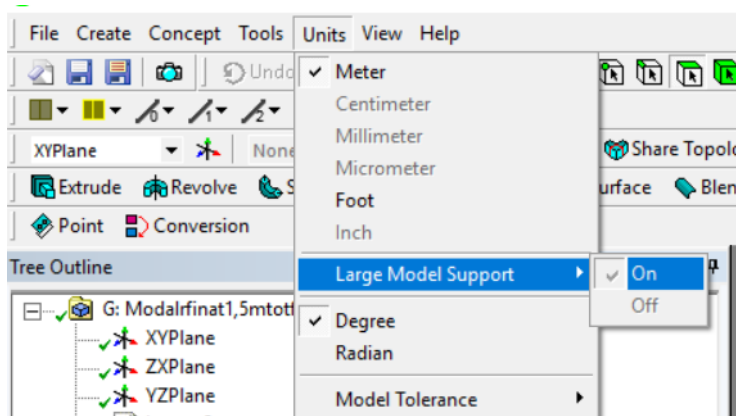


Figura 6.3.2.1.1. Activar Large Model Support

6.3.2.2. Mallat

A la figura 6.3.2.2.1.es pot veure un detall de la malla i a la taula 6.3.2.1.1 el número d'elements de cada simulació.

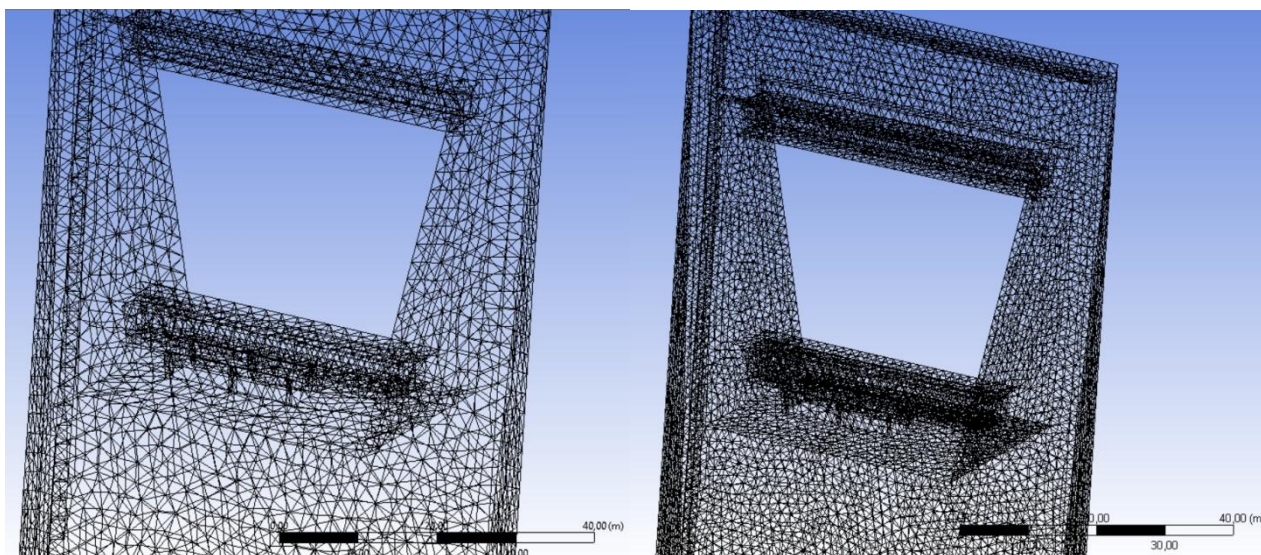


Figura 6.3.2.2.1. Detall de les malles d'elements de mida 2,5 m i 1,5 m respectivament

Mallat	Mida element	Núm.elements
1	2,5 m	683.881
2	2 m	1.331.707
3	1,5 m	3.138.613

Taula 6.3.2.2.1 Número d'elements de cada

De la mateixa manera que s'ha fet amb els altres edificis, es fixa la condició de contorn a la base (figura 6.3.2.2.2).

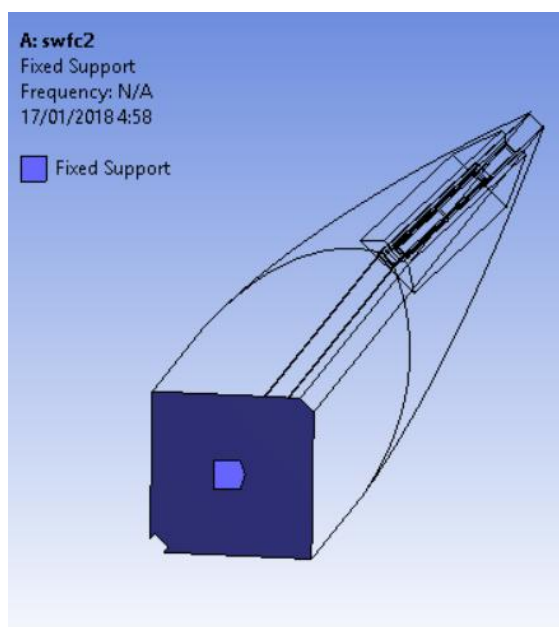


Figura 6.3.2.2.2. Fixació de la condició de contorn a la base

6.3.2.3. Anàlisi de sensibilitat de la malla

S'ha procedit al càlcul de freqüències pròpies tal com està indicat en el darrer capítol de la memòria. S'ha començat fent simulacions d'elements de mida 2 m (ja que impliquen un temps de càlcul menor) i s'ha anat disminuint la mida (major temps de càlcul) fins a la mida de 1m.

A l'hora de visualitzar resultats de les freqüències pròpies obtingudes per tractar-los

aquests es troben en una taula a la part inferior dreta de la pantalla principal (figura 6.3.2.3.1, per l'anàlisi amb elements de mida 1,5 metres).

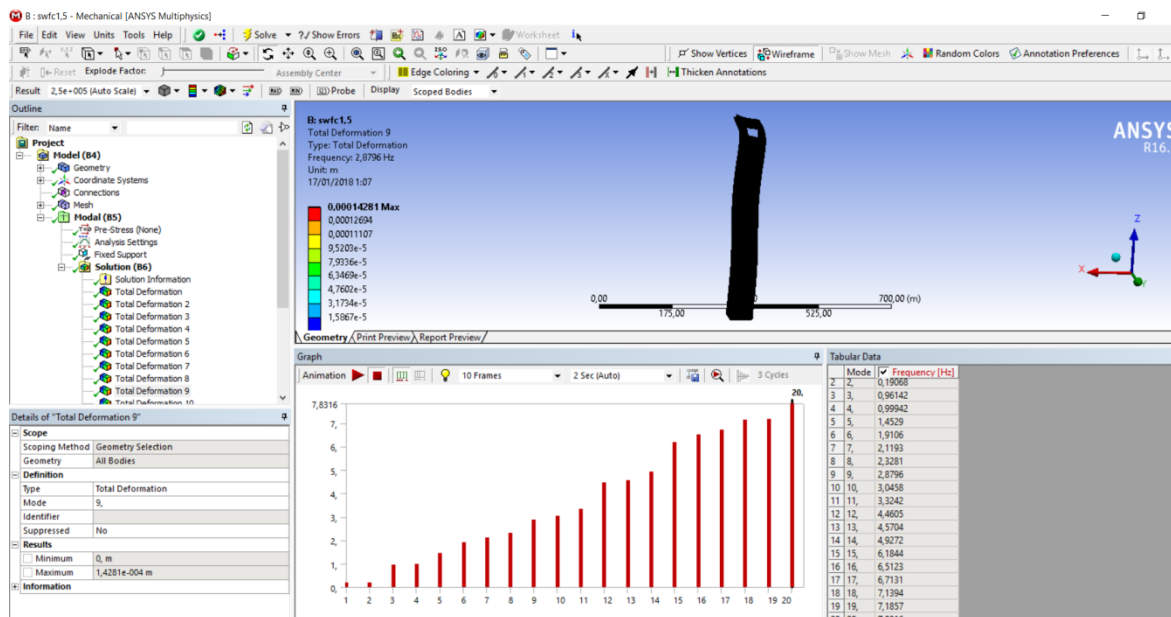


Figura 6.3.2.3.1 Resultats del Modal

A la figura 6.3.2.3.2 es pot veure la gràfica dels diferents mallats, sent el primer el de mida més gran (2,5m), el 2n el de mida 2 m i el tercer el de mida 1,5 m.

En aquesta torre es va intentar continuar simulant fins a elements de mida d'1 metre però el programa donava un error de memòria RAM durant la simulació, doncs eren masses elements per poder fer el càlcul computacional (són més de 3 milions d'elements per al càlcul de 1,5 m).

Com en els casos anteriors, a cada mallat (1r, 2n i 3r per separat) hi ha les diferents freqüències trobades en l'eix vertical. La línia del mateix color en direcció horitzontal mesura la tendència dels diferents mallats (les petites variacions trobades per una mateixa freqüència). S'identifiquen freqüències del mateix mode vibratori entre mallat perquè el símbol del marcador és el mateix, per exemple, un triangle en el mode 2 per tots els mallats.

A la gràfica es pot observar que amb elements de mida de 1.5 metres per aquesta torre ja s'arriba a la convergència i per tant, la qualitat de la malla amb aquests elements és prou bona, fins i tot amb elements més grans, per tant la falta de simulació amb elements més petits i, per tants, més nodes i elements, no és un problema per donar per correcte el mallat.

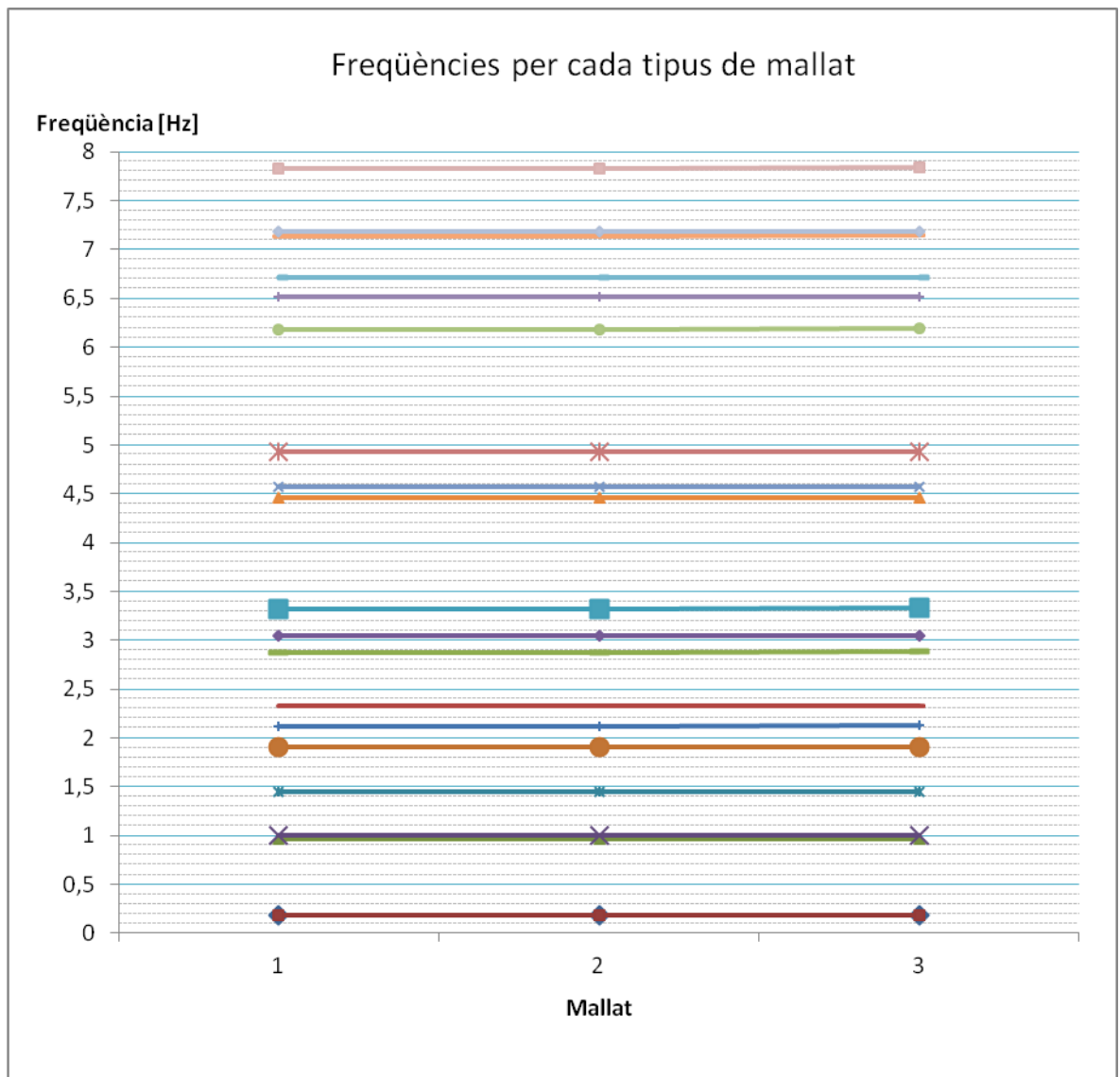


Figura 6.3.2.3.2 Evolució de les freqüències pròpies per cada mallat Sistema d'estudi

6.3.3. Resultats

A continuació es mostra una taula de totes les freqüències pròpies trobades per diferents mallats pel cas de tres materials diferents, taula 6.3.3.1. Representen les freqüències representades en les gràfiques del punt 6.3.2.

	Mode	Mallat		
		1 (2,5m)	2 (2m)	3 (1,5 m)
Freqs. [Hz]	1	0,1859	0,1859	0,1859
	2	0,19069	0,19068	0,19068
	3	0,96148	0,96145	0,96142
	4	0,9996	0,99951	0,99942
	5	1,4529	1,4529	1,4529
	6	1,9114	1,9111	1,9106
	7	2,1246	2,1217	2,1193
	8	2,3281	2,3281	2,3281
	9	2,8804	2,88	2,8796
	10	3,0504	3,0479	3,0458
	11	3,3274	3,3257	3,3242
	12	4,4624	4,4613	4,4605
	13	4,571	4,5707	4,5704
	14	4,9287	4,9279	4,9272
	15	6,1887	6,1865	6,1844
	16	6,5141	6,5132	6,5123
	17	6,714	6,7134	6,7131
	18	7,1436	7,1415	7,1394
	19	7,1873	7,1864	7,1857
	20	7,8379	7,8344	7,8316

Figura 6.3.3.1. Freqüències pròpies per cada mallat

6.3.3.1. Comparativa amb la literatura

L'informe *Modal Identification of Shanghai World Financial Center both from free and ambient response* [24] calcula les freqüències pròpies o naturals de l'estructura i des de diferents mètodes:

- Pick-Peaking method (PP)
- Random Decrement Basement Method (RDM)
- Hilbert-Huan transform Method (HHT)
- Shaking table Test

- Mètode dels elements finits MEF, sent aquest últim computacional

A la figura 6.3.3.1.1 es mostren les dades de l'informe:

The identified modal frequencies from three research areas.

Method Mode	Field dynamic test Frequency (Hz)	Finite element analysis Frequency (Hz)	Shaking table test Frequency (Hz)
1	0.1550	0.1561	0.176
2	0.1575	0.1837	0.176
3	0.4858	0.3598	0.411

Note: The structure used in the finite element model is with ATMD and the experimental structure used in the shaking table test is without ATMD.

Table 2

Identified modal information of the SWFC based on two methods under microtremors.

Method		Pick-Peaking method		Hilbert-Huang transform method	
Mode	Data location	Frequency (Hz)	Damping ratio	Frequency (Hz)	Damping ratio
1	90F	0.1550	0.0059	0.1554	0.0063
2	90F	0.1575	0.0046	0.1579	0.0048
3	85F	0.4858	0.0066	0.4878	0.0049
4	15F	0.5371	0.0074	0.5496	0.0070
5	25F	0.5737	0.0073	0.5730	0.0069
6	65F	0.9375	0.0050	0.9419	0.0049
7	55F	0.9717	0.0066	0.9747	0.0054
8	80F	1.0254	0.0085	1.0270	0.0032
9	25F	1.3965	0.0124	1.3872	0.0102
10	65F	1.4697	0.0078	1.4665	0.0107
11	85F	1.5283	0.0054	1.5279	0.0053

Figura 6.3.3.1.1. Dades de l'informe Font: [24]

Aquestes dades es poden resumir de la següent manera en una taula (taula 6.3.3.1.1)

Tipus mesura	Mesures de camp		Anàlisis previs	
	PP	HHT	MEF	STT-sense ATMD
Freq [Hz]	0,155	0,1554	0,1561	0,176
	0,1575	0,1579	0,1837	0,176
	0,4858	0,4878	0,3598	0,411
	0,5371	0,5496		
	0,5737	0,573		
	0,9375	0,9419		
	0,9717	0,9747		
	1,0254	1,027		
	1,3965	1,3872		
	1,4697	1,4665		
	1,5283	1,5279		

Taula 6.3.3.1.1. Taula amb les dades de l'informe

Per fer la comparativa s'agafa el primer dels mètodes de camp, ja que tots dos són de valors mot semblants per comparar-los amb els de l'anàlisi en Ansys. Veure taula comparativa 6.3.3.1.2.

Freqs [Hz]	Mode	Mallat 3 (1,5 m)	Informe camp 2008	Mode	Error relatiu (%)
	1	0,1859	0,155	1	19,93
	2	0,19068	0,1575	2	21,06
			0,4858	3	
			0,5371	4	
			0,5737	5	
	3	0,96142	0,9375	6	2,55
	4	0,99942	0,9717	7	2,85
			1,0254	8	
			1,3965	9	
	5	1,4529	1,4697	10	1,14
		1,9106	1,5283	11	25,01
		2,1193			
		2,3281			
	6	1,9106			
	7	2,1193			
	8	2,3281			
	9	2,8796			
	10	3,0458			
	11	3,3242			
	12	4,4605			
	13	4,5704			
	14	4,9272			
	15	6,1844			
	16	6,5123			
	17	6,7131			
	18	7,1394			
	19	7,1857			
	20	7,8316			

Taula 6.3.3.1.3. Comparació anàlisi modal amb dades de l'informe (dades de camp)

Les dues primeres freqüències naturals no coincideixen (ho fan amb un percentatge d'error del voltant del 20%) i n'hi ha d'altres que no s'han trobat. No obstant, si s'han pogut trobar les corresponents als modes 6, 7 i 10 de l'informe amb percentatges d'error d'entre 1-2,8%.

A més, s'han trobat modes més alts de vibració pròpia no llistats experimentalment.

	Mode	Mallat 3 (1,5 m)	Informe MEF	Mode	Error relatiu (%)	Informe STT	Mode	Error relatiu (%)
Freqs [Hz]	1	0,1859	0,1561	1	19,09	0,176	1	5,625
	2	0,19068	0,1837	2	3,80	0,176	2	8,34
			0,3598	3		0,411	3	

Taula 6.3.3.1.3. Comparació anàlisi modal amb dades de l'informe (MEF i SST)

Si es comparen els valors calculats amb Ansys amb els mateixos valors calculats computacionalment de l'informe es comprova com la semblança és major. El segon mode només té un error del 3,8% mentre que el primer del 19% (una mica menys que abans).

Si la comparació es fa amb el test de *shaking table* els errors dels dos primers modes són del 5,6 i 8,3% respectivament, molt menors.

Per tant la causa principal dels errors és en la geometria, doncs la freqüència del primer i el tercer mode no concorda amb els valors trobats analíticament en l'informe (tot i que sí que ho fa bastant el segon). No obstant, els valors sí s'aproximen als obtinguts amb un test fet en una estructura experimental pels autors de l'informe.

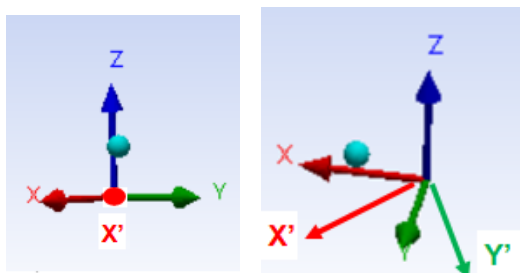
En conclusió, per bé que la freqüència del segon mode s'ha pogut assemblar molt al del resultat en MEF dels autors, hi ha unes quantes freqüències que no s'han trobat. Tot i així, hi ha hagut també molt alta concordança amb tres altres freqüències (les corresponents als modes 6,7 i 11 experimentals a la torre real).

Un altre fet interessant a destacar és que a l'informe diu que els dos primers modes són de flexió al voltant de l'eix X i Y, i es correspon amb el que es visualitza en la simulació.

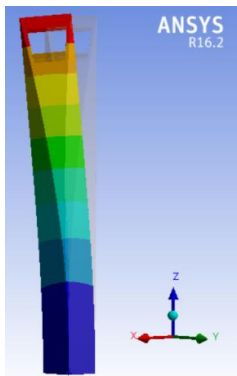
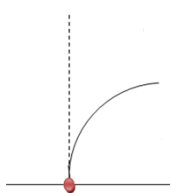
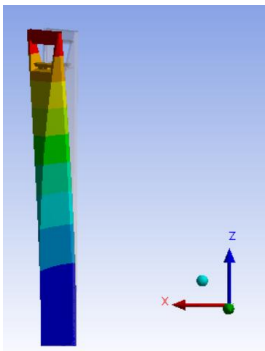
6.3.4. Modes de vibració

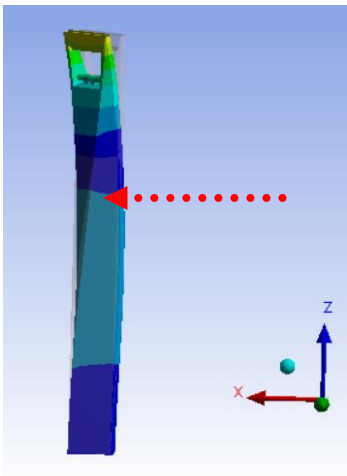
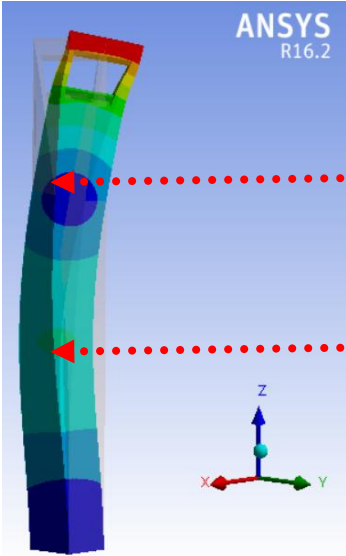
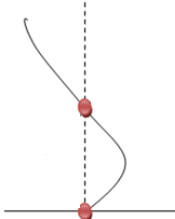
6.3.4.1. Eixos de coordenades

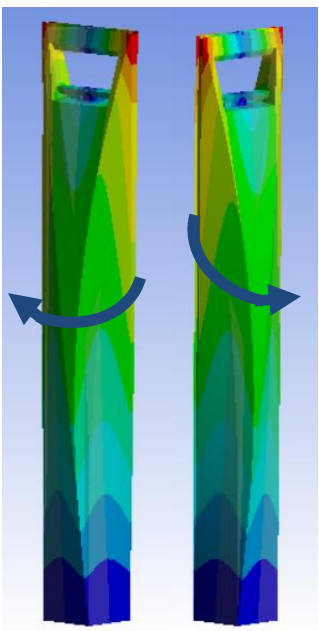
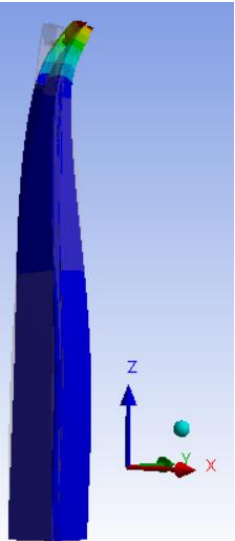
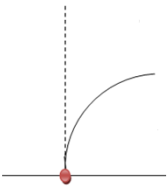
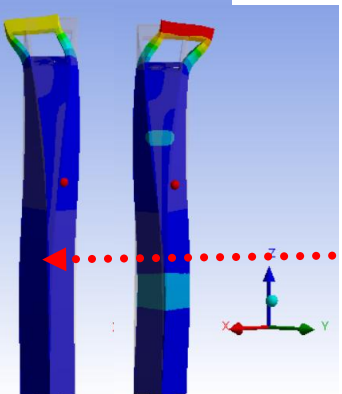
Es defineixen uns nous eixos de coordenades $X'Y'Z'$ perquè les oscil·lacions a vegades són en funció d'aquests i no dels que hi ha a l'Ansys Modal.

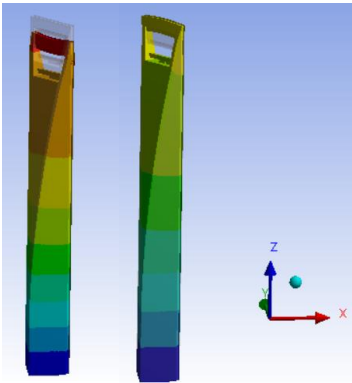
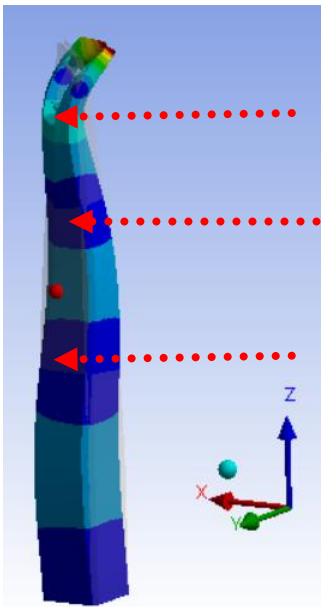
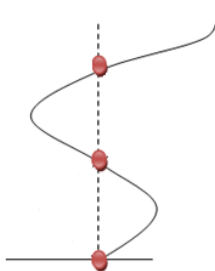
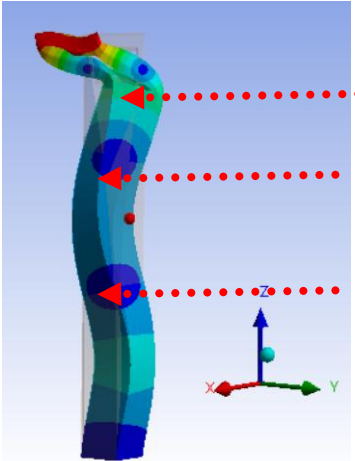


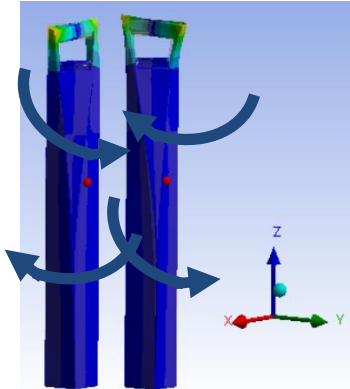
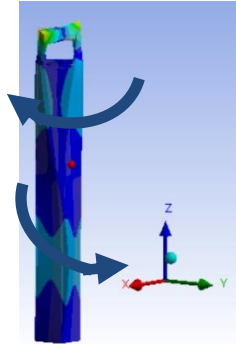
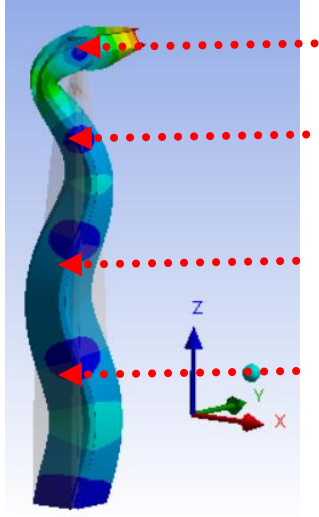
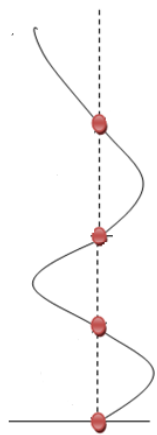
6.3.4.2. Taula Resum

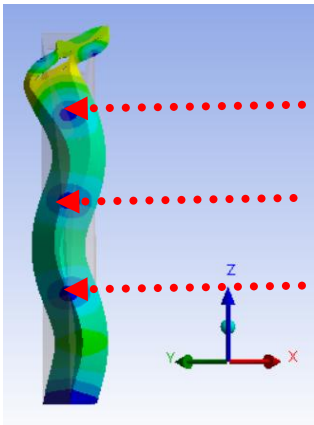
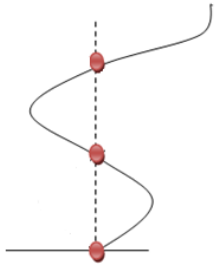
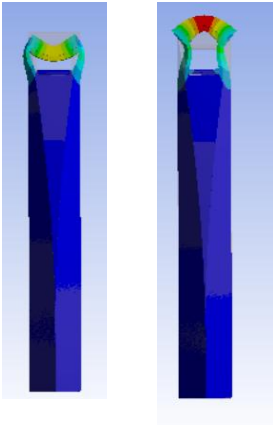
Mode	Freqüència	Imatge del Mode	Descripció del mode	Respecte quin eix?	Representació gràfica
1	0,1859		Flexió 1 node	X'	
2	0,19068		Flexió 1 node	Y	Equivalent a 1

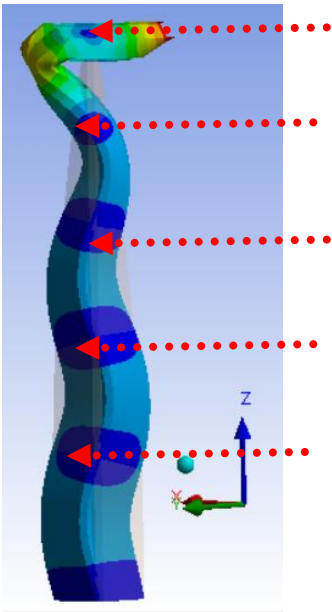
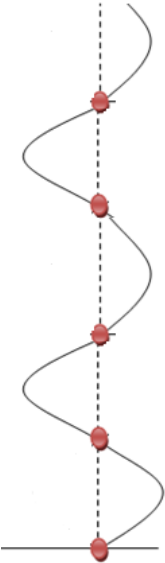
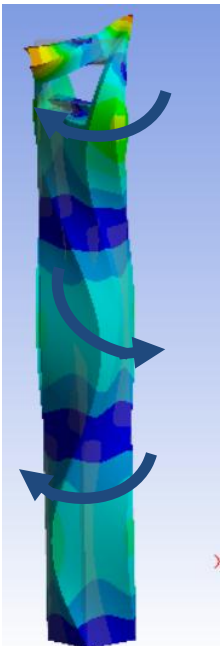
3	0,96142		Flexió 1 node (node més amunt que mode 2)	Y	Equivalent a 1
4	0,99942		Flexió 2 nodes	X'	

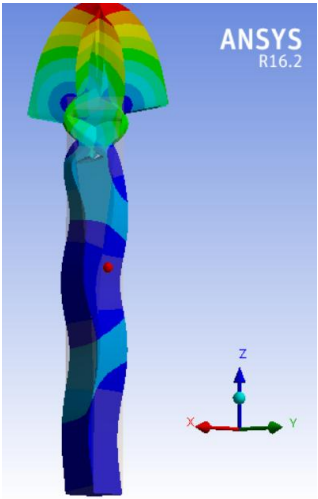
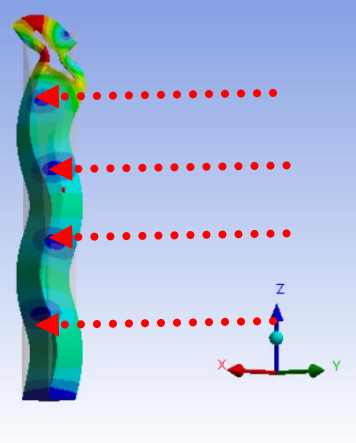
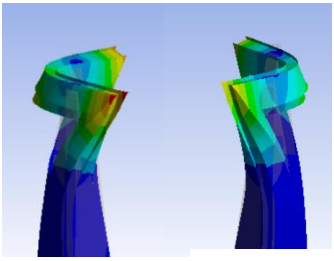
5	1,4529		Torsió		
6	1,9106		Flexió 1 node local	Y'	
7	2,1193		Flexió 2 nodes	X'	

8	2,3281		Translació Global	Eix vertical	
9	2,8796		Flexió 3 nodes	Y'	
10	3,0458		Flexió 3 nodes	X'	Equivalent a 9

11	3,3242		Torsió (2 sentits oposats)		
12	4,4605		Torsió (2 sentis oposats). La torsió de dalt és més exagerada que en el mode 11	Eix vertical	
13	4,5704		Flexió 4 nodes	Eix vertical	

14	4,9272		Flexió 3 nodes	X'	
15	6,1844		Translació local	Eix vertical	

16	6,5123		Flexió 5 nodes	Y'	
17	6,7131		Torsió (3 sentits. El de més amunt va en consonànci a amb el de més avall)	Eix vertical	

18	7,1394		Flexió 3 nodes+ Translació local part alta	X'	
19	7,1857		Flexió 4 nodes	X'	
20	7,8316		Torsió local	Eix vertical	

6.4. Anàlisi modal i despreniment de vòrtex

S'ha trobat una gràfica que relaciona el nombre de Re amb el de St, per diferents seccions, com les dels edificis estudiats (quadricular o quasi triangular com el SWFC en certs pisos per exemple), però és per màxim valors de $Re=10^5$ (figura 6.4.1). Això fa que suposant Dimensions característiques dels edificis estudiats de 25 metres mínim, les velocitats del vent hagin de ser extremadament petites per treure'n algun exemple. Caldria alguna gràfica per valors de Reynolds més elevats.

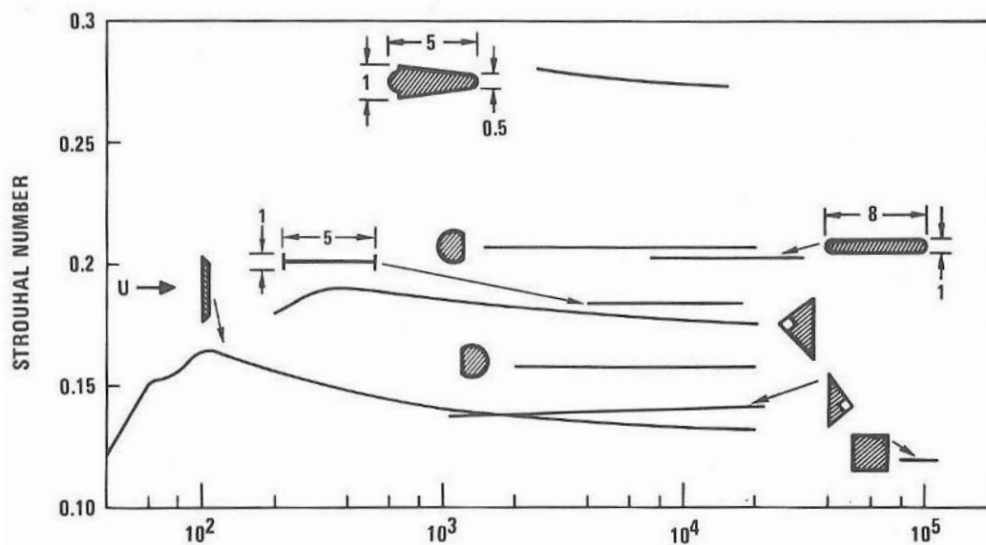


Figura 6.4.1. Re i St per diferents formes. Font: *Flow-induced vibration*

7. ANÀLISI AERODINÀMIC

7.1. Anàlisi aerodinàmic de la CN Tower de Toronto

S'ha procedit a realitzar un breu estudi aerodinàmic de la CN Tower de Toronto amb Ansys Workbench. En concret, es calcularà el valor del coeficient de drag (c_d) mitjançant Ansys Fluent (per després trobar la força de Drag) i s'observaran les velocitats i pressions a l'edifici. Aquesta força de resistència a l'avanç pot ser extrapolable a la càrrega lateral que rep l'edifici procedent de les forces del vent incident. Aquesta força resultant s'aplicaria al centre de masses de l'edifici.

7.1.1. Consideracions prèvies

No s'ha considerat l'efecte de la capa límit atmosfèrica, que és tal que genera perfils parabòlics de velocitat des del terra i va augmentant amb l'alçada. En comptes d'això s'ha modelat un flux elemental uniforme com a simplificació de la realitat.

Per tal de fer una aproximació de la velocitat del vent que podria incidir s'ha buscat informació sobre aquesta velocitat a alçades molt elevades.

Una altra consideració a tenir en compte és que es va realitzar la simulació de dues parts de la torre per separat, la base i el mirador per una banda, i, de l'altra, les antenes; ja que és complex crear un mallat on hi ha formes tant diferents a gran escala i que la simulació doni correcte amb els coneixements actuals de CFD.

Pel que fa a la velocitat del vent

S'ha estudiat el vent que actua incident a la cara dels ascensors (figura 7.1.1.1). El vent vindria incidint en direcció normal al paper.

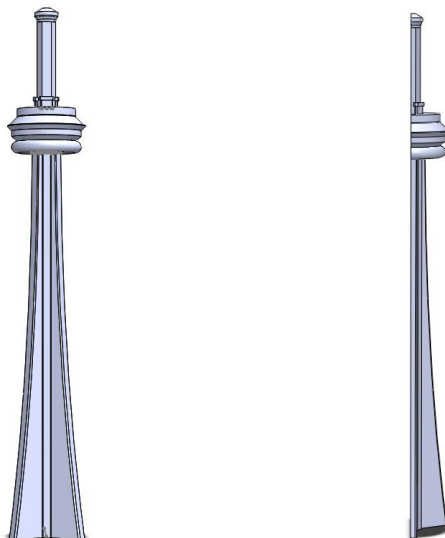


Figura 7.1.1.1 Cara incident de l'estudi i sòlid meitat per fer l'anàlisi simplificat

Hi ha una sèrie de premises que cal considerar:

- El sòlid és simètric, per tant només es simularà la meitat, fent un tall al sòlid (figura 7.1.1.1)
- Just en la part frontal es produirà una zona d'estancament o velocitat mínima. En aquest punt l'energia cinètica del fluid es convertirà en pressió.
- El tamany de l'estela no pot ser el mateix en tot l'edifici. En concret, de la simulació de la base amb el mirador, la part d'aquest es preveu més aerodinàmica (perquè té més forma cilíndrica), mentre que, alhora, de la simulació de les antenes també tindrà representacions diferents.
- És molt important tenir en compte que sempre que es pugui aplicar l'equació de Bernoulli les pressions seran de valors oposats a la velocitat. Això implica que en els punts on hi hagi velocitats altes, hi haurà velocitats mínimes, i a la inversa.
- Per equació de continuïtat, a més àrea de contacte li correspon menys velocitat, i, per tant, més pressió. A menys àrea, més velocitat i menys pressió.

Pel càlcul en CFD cal saber quina és l'àrea projectada que veu l'aire. A continuació es mostra com s'ha realitzat el càlcul de la mateixa partint de solidworks.

Àrea simulació base (columnes i mirador)

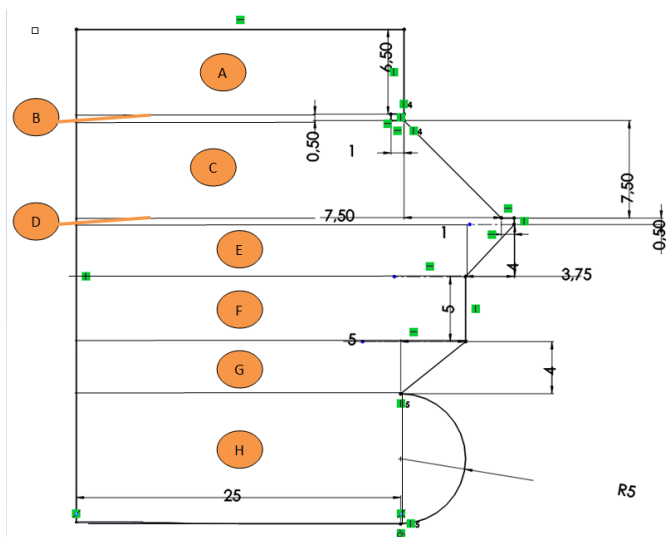


Figura 7.1.1.2. Mides mirador

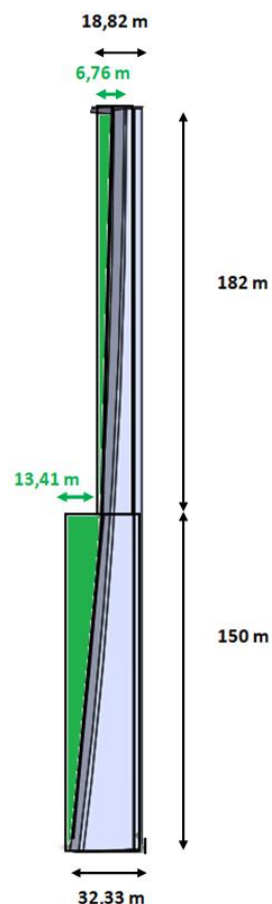


Figura 7.1.1.3 Mides columnes

	Àrea [m ²]	Àrea [m ²]
A	25,25*6,5	164,125
B	24,25*0,5	12,125
C	25,25*7,5+(7,5*7,5/2)	217,5
D	33,75*0,5	16,875
E	30*4+3,75*4	135
F	30*5	150
G	25*4+4*5	120
H	25*10+(25*pi/2)	289,2699
	Atot mirador	1104,8949

Taula 7.1.1.1 Àrea mirador: càlcul

Per calcular l'àrea projectada només cal sumar les del mirador i les de les columnes. EN el cas del mirador se subdivideix el croquis de revolució en diferents figures geomètriques (veure figura 7.1.1.2) i es fa el mateix amb les columnes. En aquest cas, les corbes s'aproximen per triangles, i n'hi ha dos, per cada pla amb el que es va fer l'operació de recobert. Aquests triangles (color verd) es resten del rectangle que els engloba (figura 7.1.1.3)

$$A_{\text{mirador}} = A_A + A_B + \dots + A_H = 1104,9 \text{ m}^2.$$

$$A_{\text{columnes}} = (18,82 \cdot 182 - 6,76 \cdot 182) + (32,33 \cdot 150 - 13,41 \cdot 150) = 5032,92 \text{ m}^2.$$

Finalment:

$$A_{\text{total}} = 1104,8949 + 5032,92 = \mathbf{6137,81 \text{ m}^2}.$$

Àrea simulació antenes

Amb les antenes es fa el mateix que amb el mirador, sumant cada rectangle en el que queda subdividida cada regió del croquis de revolució (figura 7.1.1.4).

$$A_{\text{antenes}} = 0,75 \cdot 7 + 1 \cdot 16 + 1,2 \cdot 19 + 2,28 \cdot 16 + 4 \cdot 38 = \mathbf{260,880 \text{ m}^2}.$$

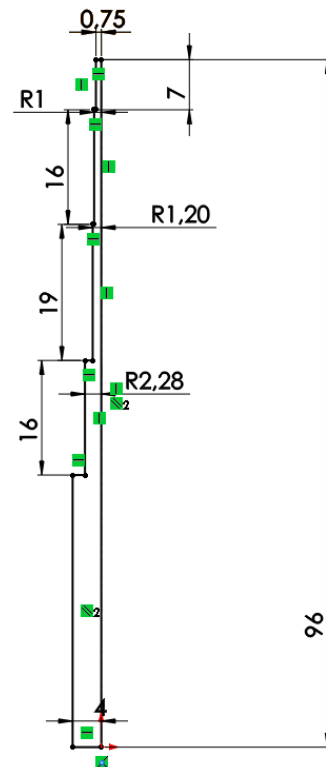


Figura 7.1.1.4 Mides antenes

7.1.2. Simulació de la base i el mirador

7.1.2.1. Geometria

S'ha importat el sòlid sencer en format *iges* prèviament activant Units→ *Large Model Support*→*On* , ja que la torre fa 533 m d'alçada i si no es fes així, el model no cabria.

El primer que es fa és importar el sòlid i es realitza un Sketch en el pla ZX per tal de dibuixar la caixa que representa el túnel de vent per fer la simulació. A continuació s'extrudeix la caixa pels dos costats (profunditat) i es crea una operació booleana en la que es restarà el sòlid torre del sòlid caixa de fluid.

Tot això es pot veure a la figura 7.1.2.1.1.

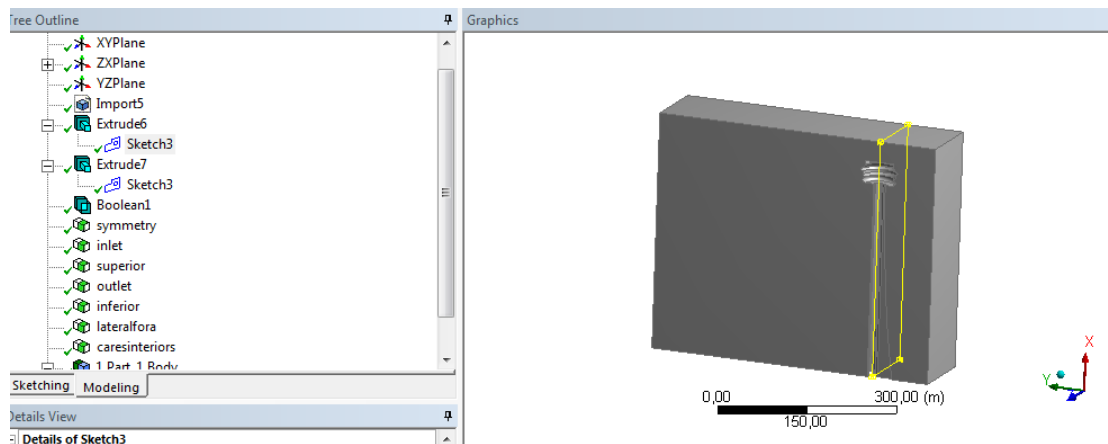


Figura 7.1.2.1.1. Geometria de l'estudi

Per altra banda, es defineixen les diferents cares de la caixa. A saber:

- Inlet: cara d'entrada del fluid incident
- Outlet: cara per on surt el fluid
- Symmetry: cara de simetria (ja que estem simulant la meitat del sòlid perquè és simètric)
- Superior, "lateralfora": les cares respectives, on també hi incidirà el l'aire
- Inferior: la cara que simula el contacte amb el sòl en la vida real (cara inferior de la caixa). Posteriorment aquesta cara es definirà com a "Stationary Wall", és a dir sense moviment perquè s'estudia un edifici.
- Cares interiors: Per tal de facilitar el mallat posterior amb l'eina de selecció de cares se seleccionen totes les cares internes que han quedat en el buit que forma la torre dins de la caixa.

La caixa per simular té les següents mides (figura 7.1.2.1.2):

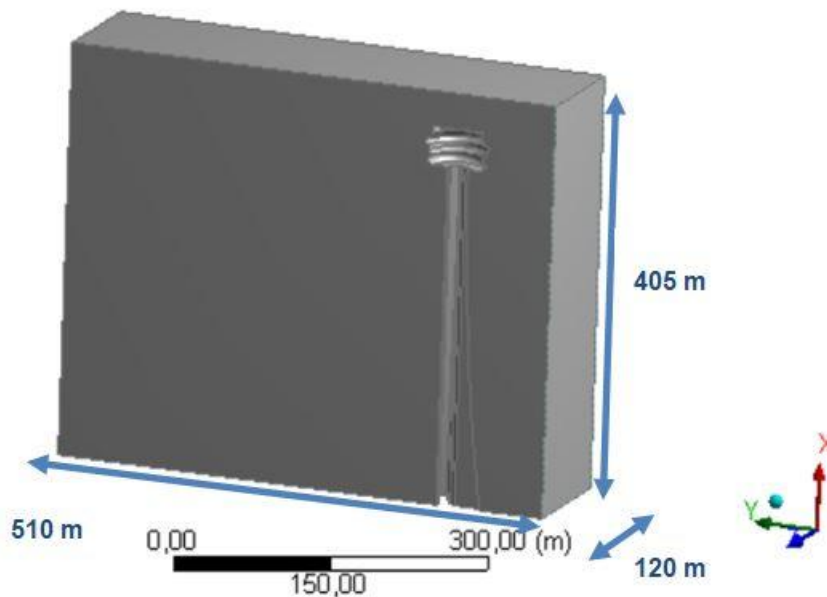


Figura 7.1.2.1.2 Caixa de túnel de vent

7.1.2.2. Mallat

S'han realitzat dos mallat iguals però amb diferent mida d'elements. No s'ha procedit al càlcul de la capa límit per ajustar la malla degut a que la torre és molt esvelta i se seguida es perd el contacte, per tant la capa límit tindria un comportament no convencional, a diferència de si s'estés simulant un perfil aerodinàmic allargat, per exemple.

El mallat realitzat ha consistit en els següents passos:

- Face Sizing de les cares interiors (que prèviament s'han definit com a regió) (figura 7.1.2.2.3). Mida 2 m i 1,5 m respectivament.
- Body sizing per mitja d'esfera d'influència a la zona on hi ha el canvi de geometria entre les columnes i el mirador, per la part del darrere, perquè és propensa a desprendiments, o remolins (figura 7.1.2.2.5). La mida dels elements en aquesta regió ha estat de 1,5 m i 1 m respectivament. Per tal de fer l'esfera d'influència cal prèviament definir unes coordenades i un radi (figura 7.1.2.2.4). En el segon mallat s'ha fet lleugerament més gran.

Veure taula 7.1.2.2.1.

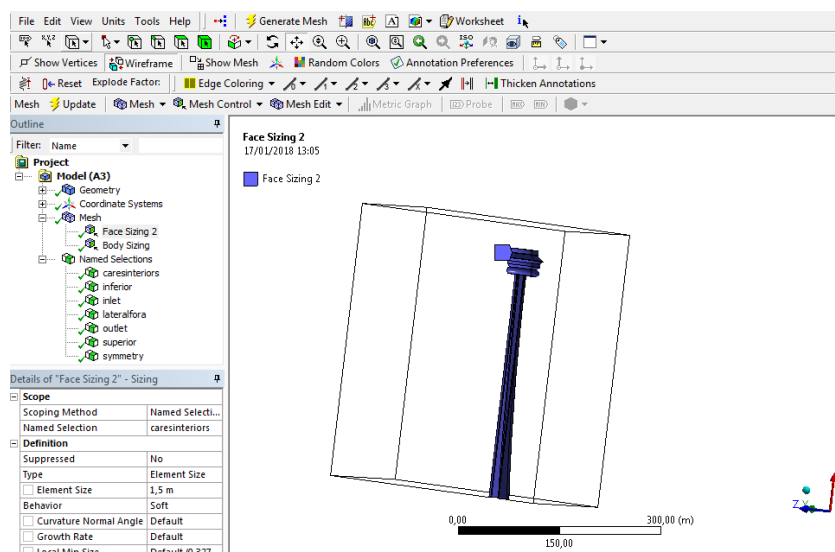


Figura 7.1.2.2.3 Body sizing

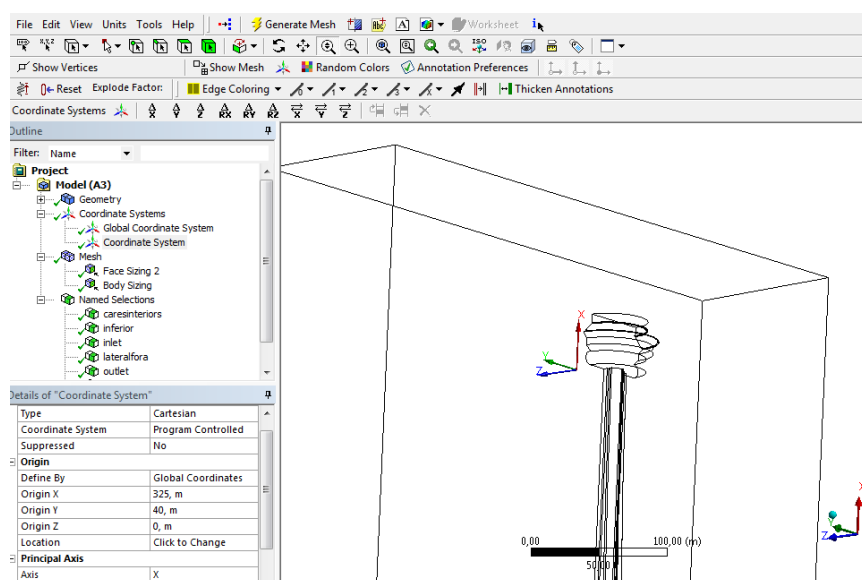


Figura 7.1.2.2.4 Creació de coordenades de l'esfera i el seu radi

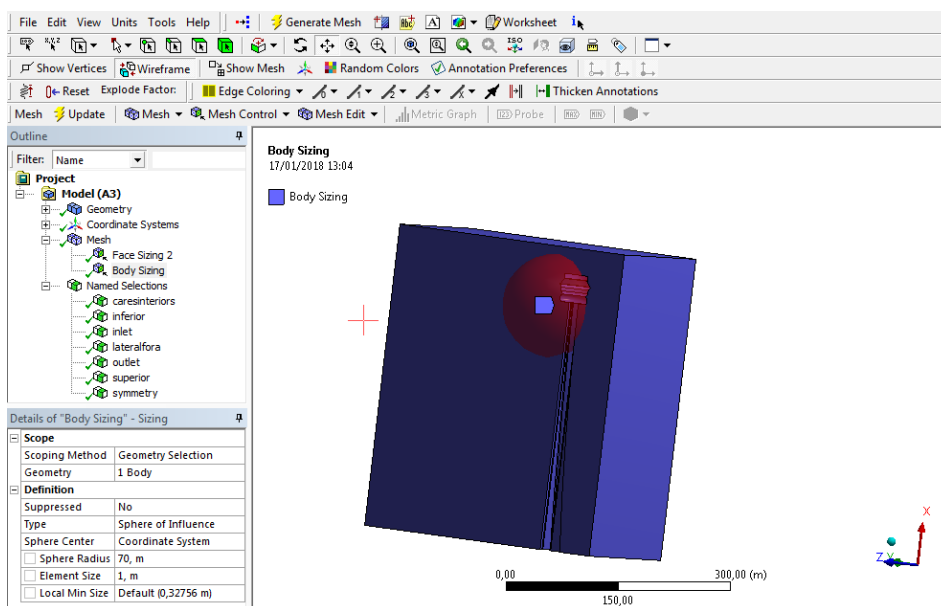


Figura 7.1.2.2.5 Mallat amb l'esfera

Finalment, el malat per elements tetraèdrics de mida 1,5 o 1 m en aquesta zona (respectivament) queda de la següent manera (figura 7.1.2.1.6).

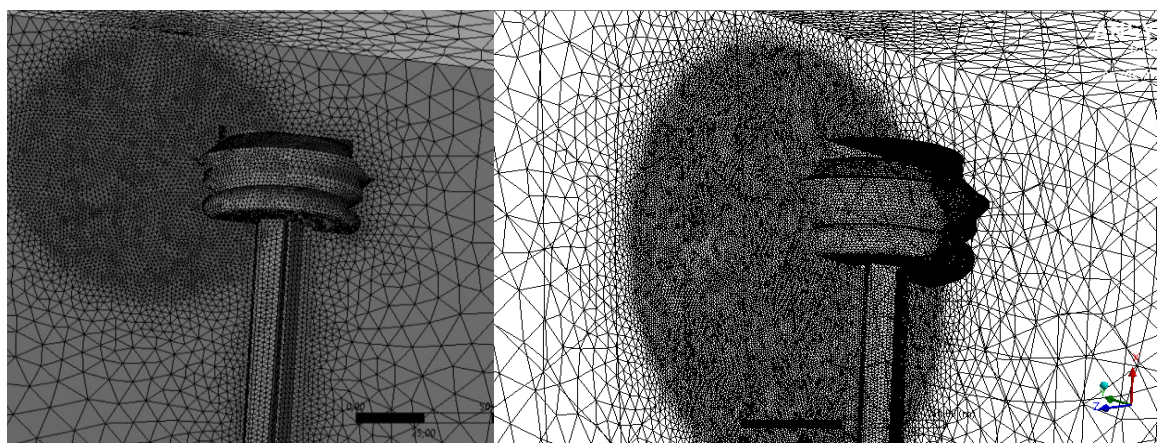


Figura 7.1.2.1.6 Mallat final amb elements de 1,5 m i 1

Mallat	Mida element	Núm.elements	Núm. nodes
1	2 i 1,5 m	1.004.299	176.479
2	1,5 i 1 m	6.409.150	1.092.880

Taula 7.1.2.2.1. Taula dels mallats

En aquest segon mallat s'ha arribat quasi als 6,5 milions d'elements, fent la simulació molt llarga.

Aquests valors s'obtenen a Mesh/Statistics (figura 7.1.2.2.7)

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (65,5120 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge L...	3,5999e-003 m
+ Inflation	
+ Assembly Meshing	
+ Patch Conforming Options	
+ Patch Independent Options	
+ Advanced	
+ Defeaturing	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1092880
<input type="checkbox"/> Elements	6409150
Mesh Metric	None

Figura 7.1.2.2.6. Estadístiques del Mesh

7.1.2.3. Setup

El *tree* del setup del Ansys Fluent és de la següent forma (figura 7.1.2.3.1)

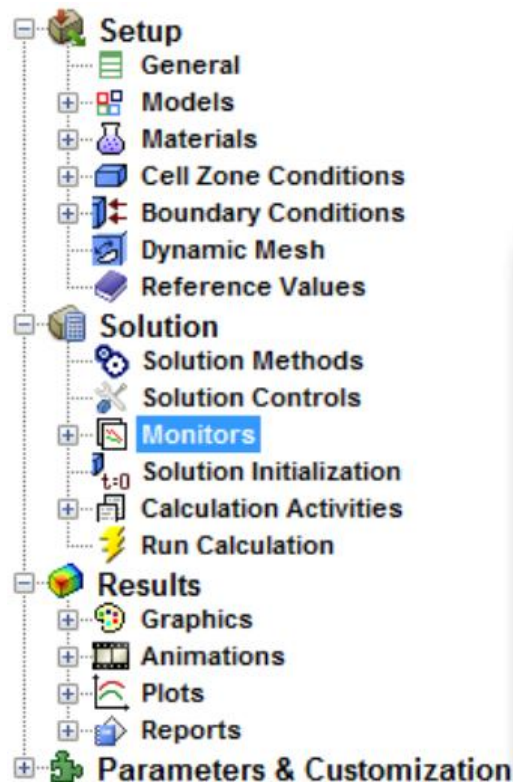


Figura 7.1.2.3.1. Setup

A continuació s'explicarà breument el més important del què s'ha triat de cada pestanya:

- General: definició de problema estacionari
- Models: S'empra el model amb turbulència k-epsilon
- Material: fluid aire.
- Boundary Conditions o condicions de contorn: són les que ja s'han explicat a l'apartat de geometria. Bàsicament les parets lateral i superior són mòbils i se'ls hi diu amb quina velocitat i direcció d'aquesta (cal prémer "1" en la coordenada corresponent a la direcció del fluid, també amb el signe pel sentit), i la inferior és estacionària. Els altres valors queden per defecte, però cal assegurar-se que la paret de symmetry és de tipus simetria.

- Reference Values: es posen els valors de referència per ajudar a començar el càlcul. En aquest cas, l'àrea projectada calculada anteriorment i la velocitat escollida. S'ha d'escollir compute from inlet.
- Monitors: crear un cd per la zona "cares interiors" que representa el cos. Clicar Plot i Print to Console.
- Solution Initialization: Hybrid Initialization i després a Run Calculation dir-li el nombre de iteracions i comença a calcular.

7.1.2.4. Resultats

7.1.2.4.1 C_D , residus i F_D

A la gràfica de la figura 7.1.2.4.1.1 es pot veure l'evolució del cd fins a convergir al cap de 300 iteracions al valor de 1,588 (o 1,5266 amb el primer mallat). El valor és coherent doncs engloba dos tipus de geometries diferents: aproximadament cilíndrica al mirador que li hauria de donar valors del voltant de 1,2, i quelcom entre placa plana de valor 2 a la columna curvada on incideix que pels costats en desviar-se també assembla a un triangle equilàter de valor 1,6. Els valors de cd , segons la forma geomètrica, però sense acabar en punxa). Els valors per cada figura es troben a la figura 7.1.2.4.1.1.












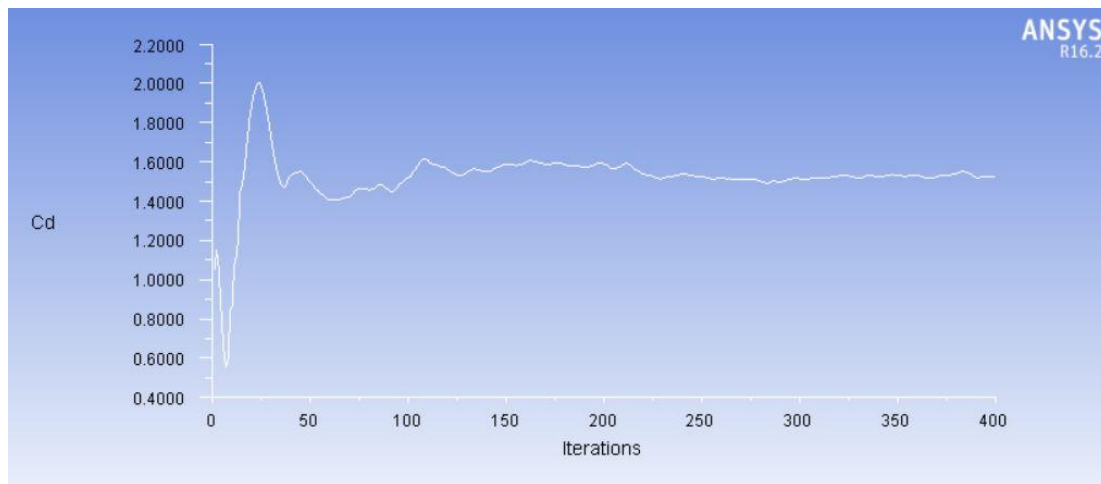
Forma	C_D basado en el área frontal	Forma	C_D basado en el área frontal	Forma	C_D basado en el área frontal
Cilindro cuadrado:		Semicilindro:		Placa:	
→ 	2.1	→ 	1.2	→ 	2.0
→ 	1.6	→ 	1.7	Placa delgada normal a una pared:	
Semitubo:		Triángulo equilátero:		→ 	1.4
→ 	1.2	→ 	1.6	Hexágono:	
→ 	2.3	→ 	2.0	→ 	1.0
					0.7

Figura 7.1.2.4.1.1. Valors de cd per $Re > 10^4$

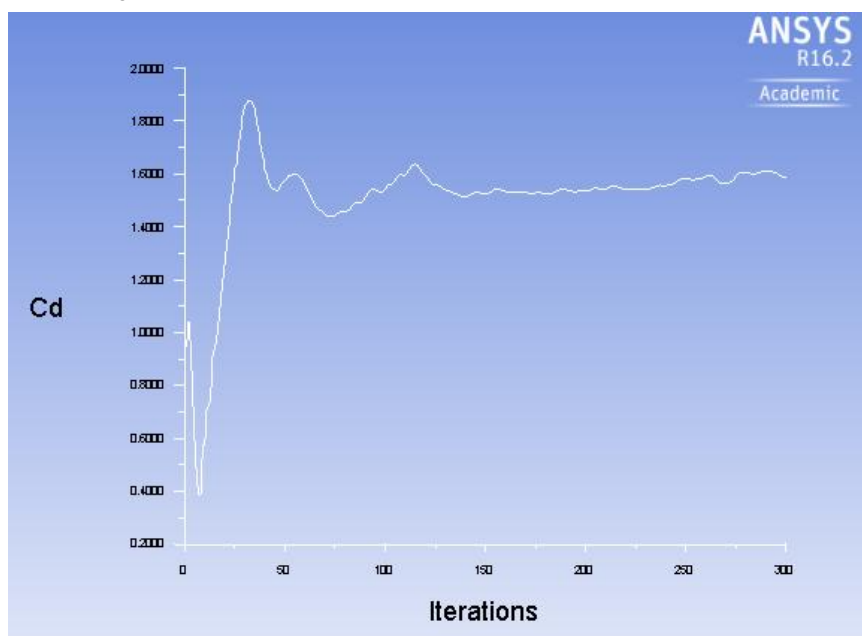
Amb el primer mallat s'han fet 400 iteracions i el resultat ha estat d'un cd de (veure figura 7.1.2.4.1.2)

Amb el segon mallat s'han fet 200 iteracions, se n'haurien d'haver realitzat més idealment però el nombre d'elements tan alt (més de 6,4 milions) ha fet que la simulació trigués moltes hores. Probablement menys elements i més iteracions donarien uns resultats més fiables. No obstant, a la gràfica es veu que ha convergit bastant (figura 7.1.2.4.1.3)



1.5266e+00 0:00:00 0

Figura 7.1.2.4.1.2. Gràfica de l'evolució del cd i valor últim



**612847 cells
9.1238e-04 1.5881e+00 0:00:00 0**

Figura 7.1.2.4.1.3 Gràfica de l'evolució del cd i valor últim

A la gràfica 7.1.2.4.1.4 i a la 7.1.2.4.1.5 es pot veure l'evolució dels residus de les equacions de continuïtat, Navier-Stokes i k- ϵ . Aquestes dues darreres tenen valors molt baixos, en especial la segona, lo qual és molt bo, mentre que la de continuïtat dona valors més alts del voltant de 0,5 pels dos mallats.

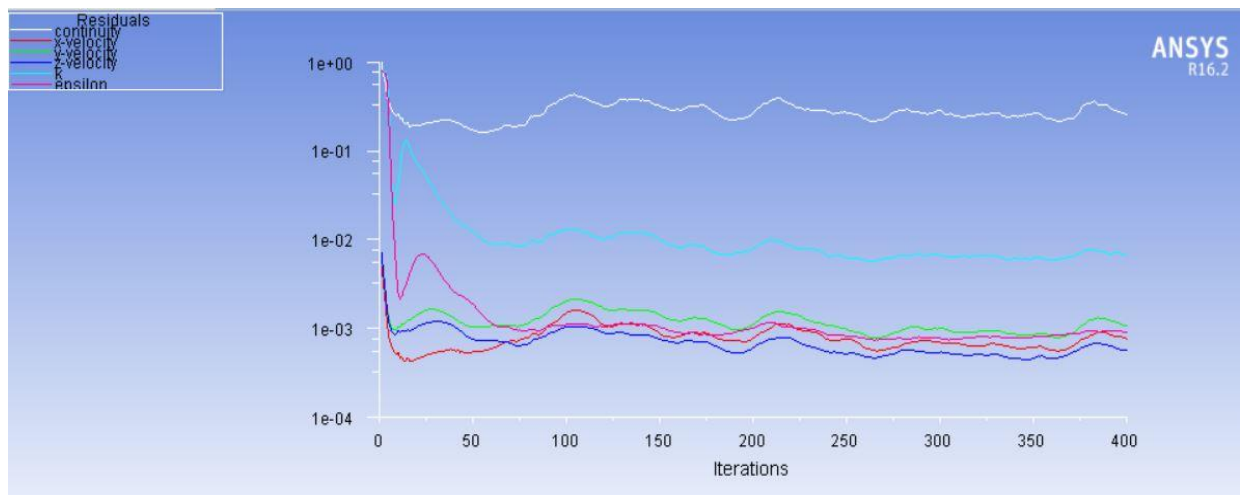


Figura 7.1.2.4.1.4. Gràfica dels residus de les equacions

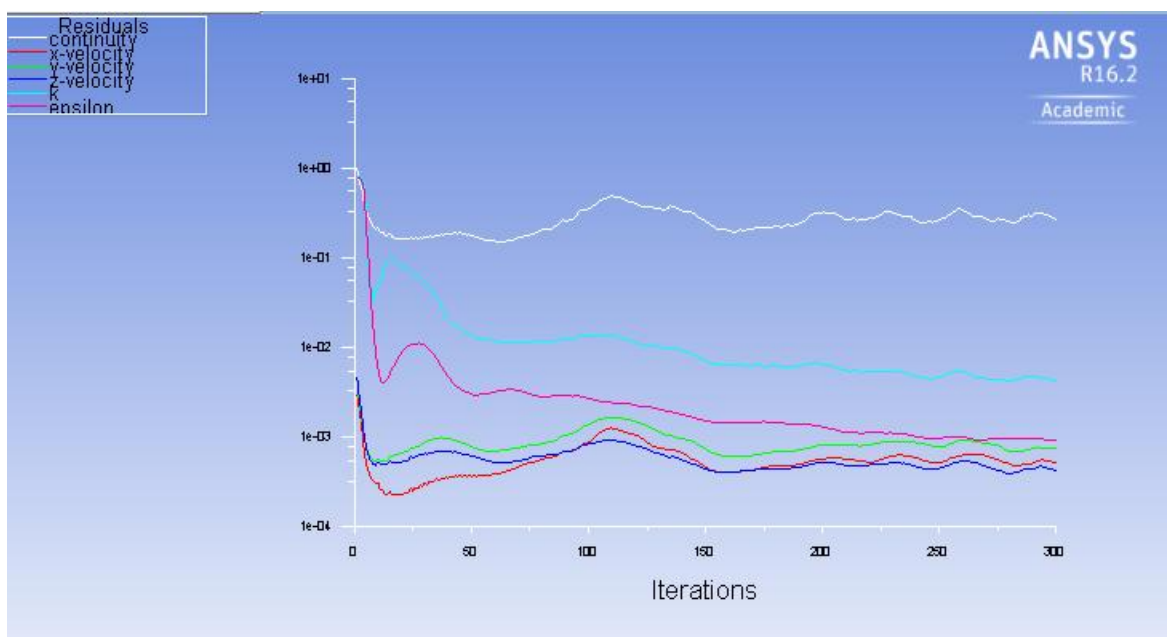


Figura 7.1.2.4.1.5 Gràfica dels residus de les equacions

La Força d'arrossegament o de drag es calcula de la següent manera (s'ha fet servir el segon valor de c_d) :

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot u_{\infty}^2 \cdot A_D = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 1,588 \cdot 20^2 \cdot 6137,81 = 2387,97 \text{ kN}$$

És un valor molt elevat de força però s'ha de considerar que s'ha escollit una velocitat del vent de 20 m/s i que la torre mesura més de mig quilòmetre d'alçada.

Per tal de veure on s'aplicaria la força només cal anar a l'anàlisi modal del mateix edifici i veure les Propietats d'aquella part de l'edifici, i diu on està el centre de masses.

Per exemple, en el cas de la base que s'ha simulat, per saber quin seria el punt d'aplicació d'aquesta càrrega lateral provocada pel vent s'hauria d'aplicar a una alçada de 133,67 metres figura 7.2.4.1.6)

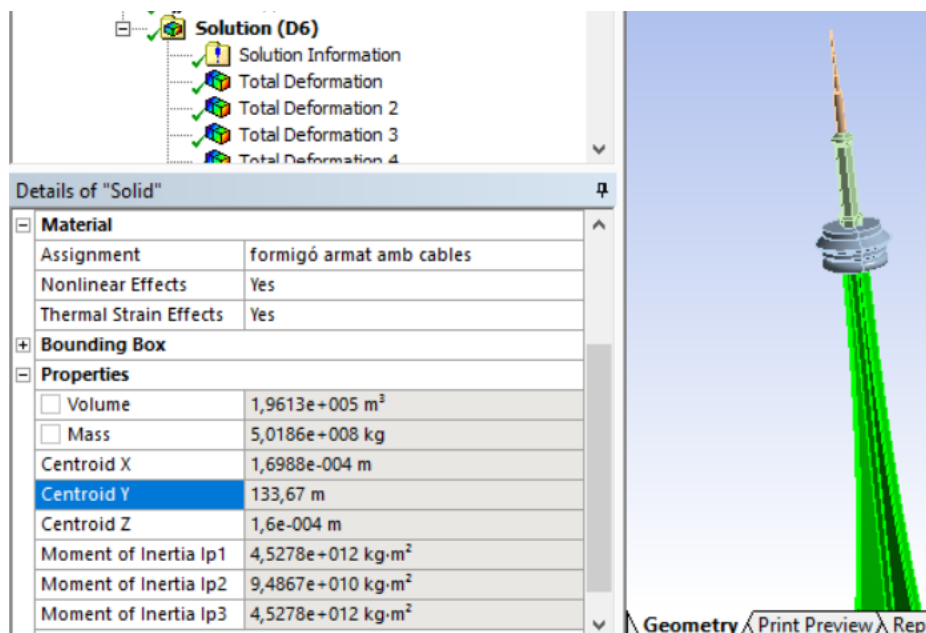


Figura 7.1.2.4.1.6. Centre de masses de la base columna en forma de Y

7.1.2.4.2 Velocitats

S'observen dos comportaments diferents. D'una banda, quan el flux topa amb la cara lleugerament corba de la base el flux és mínim i comença a accelerar adaptant-se als contorns d'aquest, per tornar a topar amb una cara plana. En canvi, per altures més elevades, a la zona del mirador, el flux s'adapta bastant millor des del principi doncs la forma d'aquest és cilíndrica i a més accelera molt més ràpidament (figura 7.1.2.4.2.1).

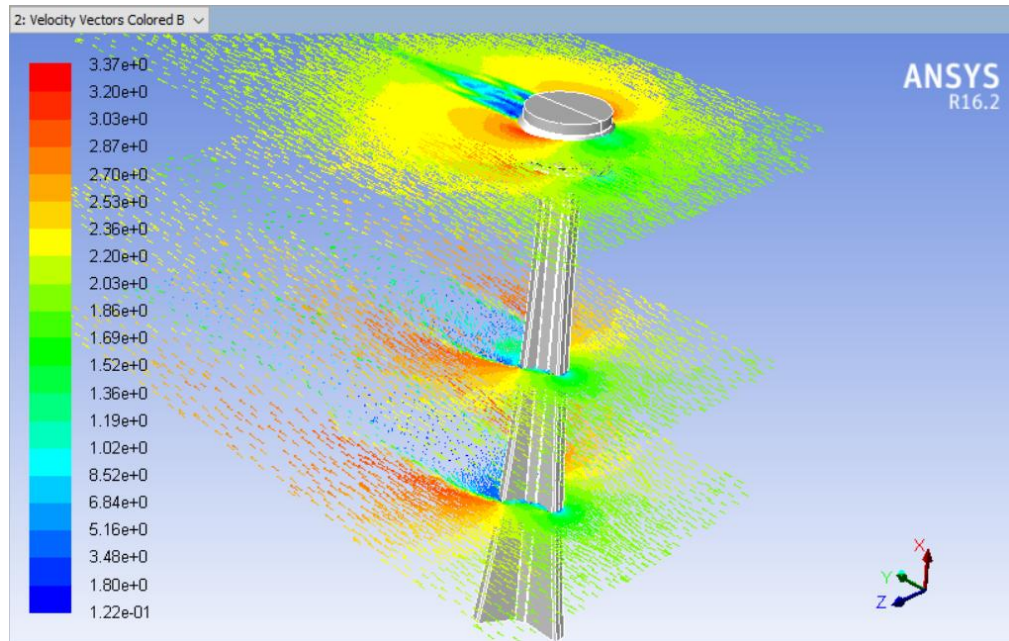


Figura 7.1.2.4.2.1. Diferents talls en alçada per veure les velocitats

A més, com més amunt el flux s'accelera més al marxar pels costats (figura 7.1.2.4.2.2.)

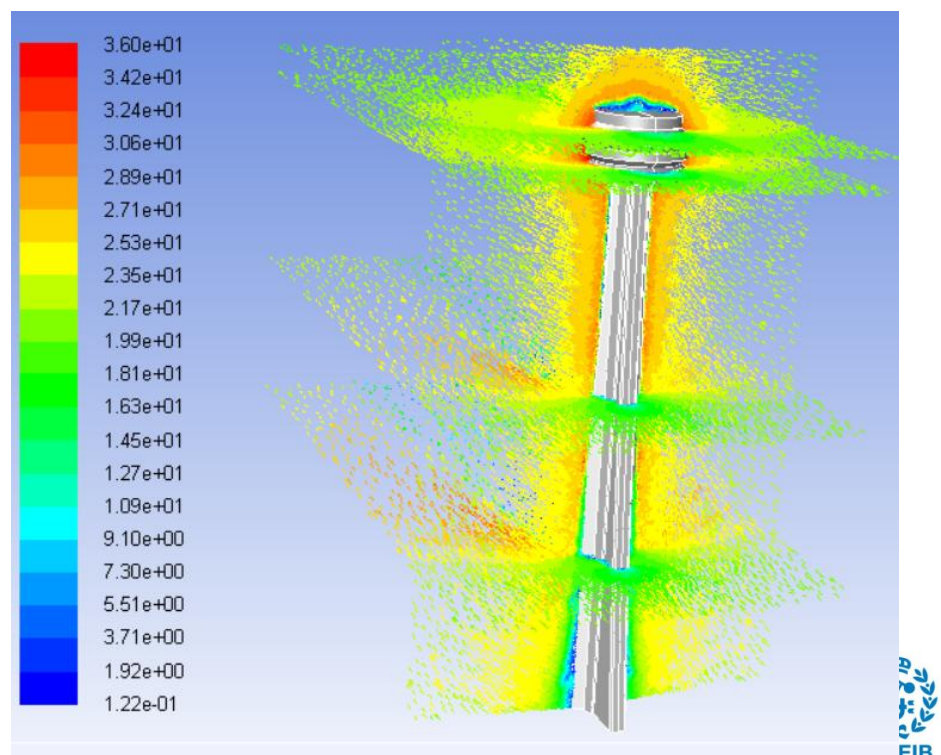


Figura 7.1.2.4.2.2 Talls en eix longitudinal

Les esteles deixades també són majors com més avall, doncs la zona és menys aerodinàmica (figura 7.1.2.4.2.3.)

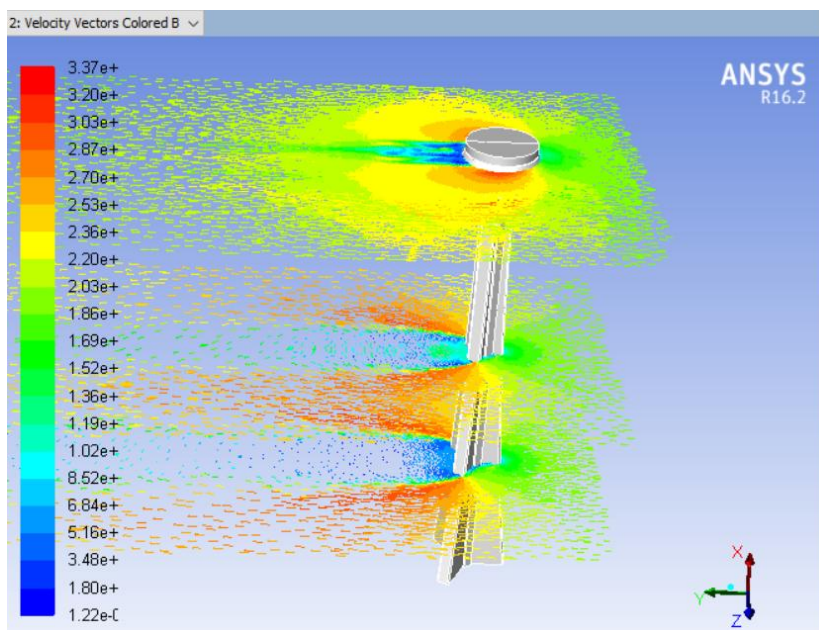


Figura 7.1.2.4.2.3. Esteles

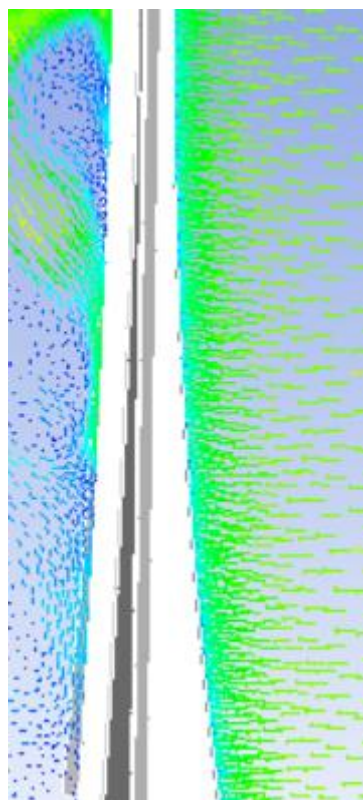


Figura 7.1.2.4.2.1. Remolins

A la figura 7.1.2.4.2.4 s'observa com el flux s'accelera per sobre del mirador (que no té antena) i es produeixen remolins a les parts més immediata de darrere de la torre.

7.1.2.4.3 Pressions

Per la cara incident hi ha valors de pressió més elevats (vermells) doncs és on primer arriba la velocitat i és mínima. A la part més lateral i del darrere les pressions en canvi són baixes.

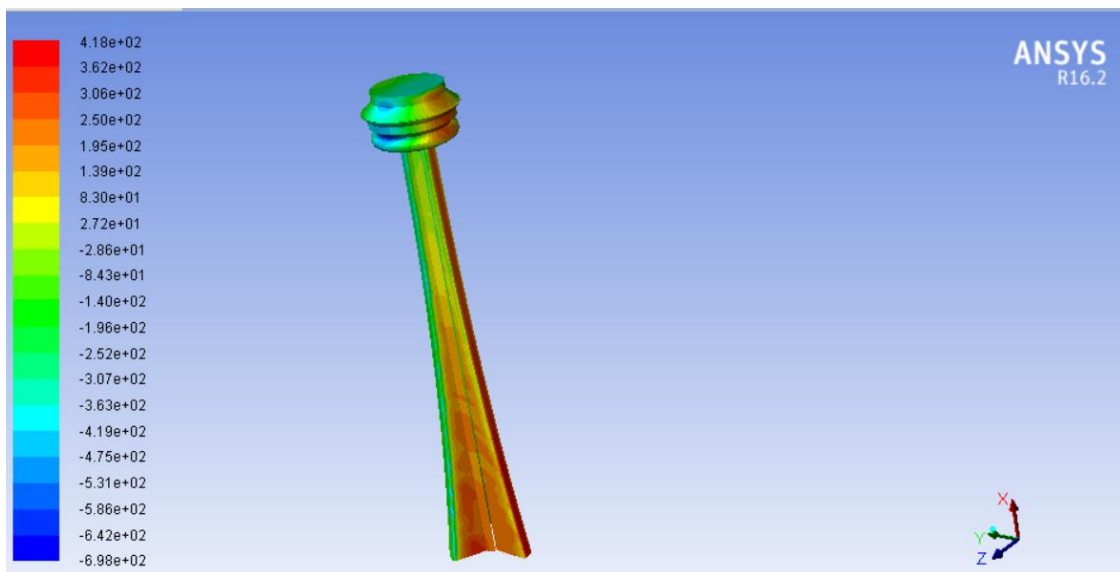


Figura 7.1.2.4.3.1. Pressions sobre l'entrada al cos

El mateix fenomen es pot observar en el pla de simetria.

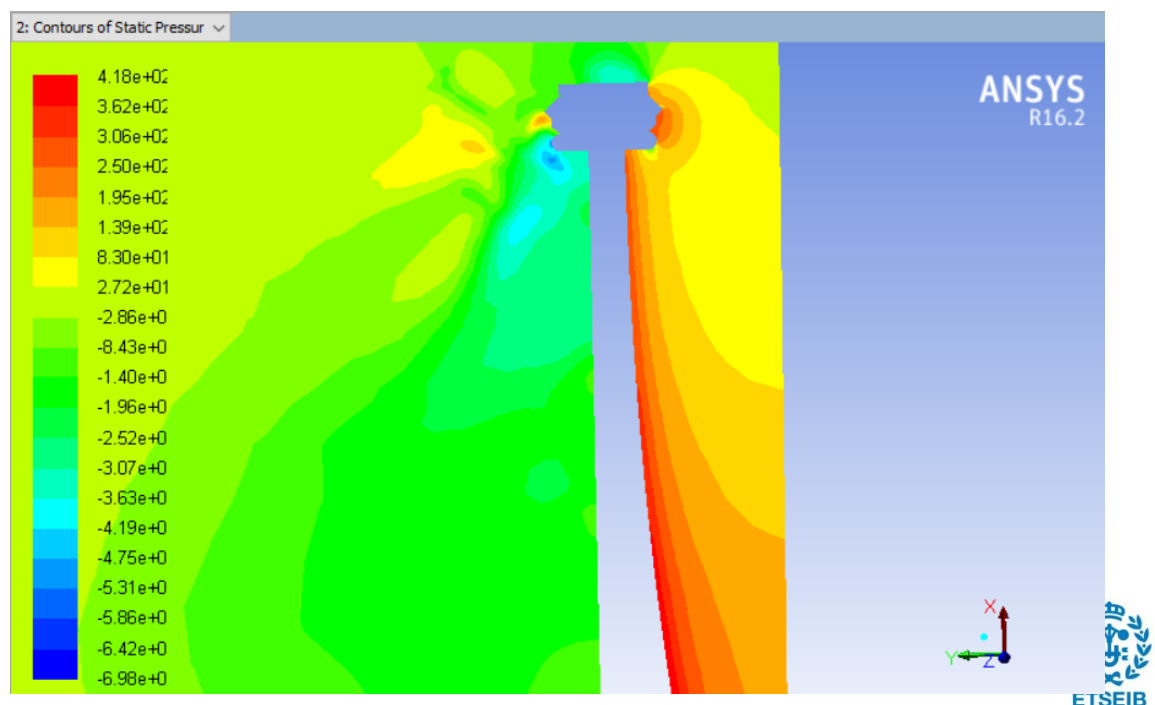


Figura 7.1.2.4.3.2. Pressions sobre el pla de simetria

Per altra banda, s'observa que la distribució de pressions és simètrica ja que la torre ho és també (figura 7.1.4.3.3.)

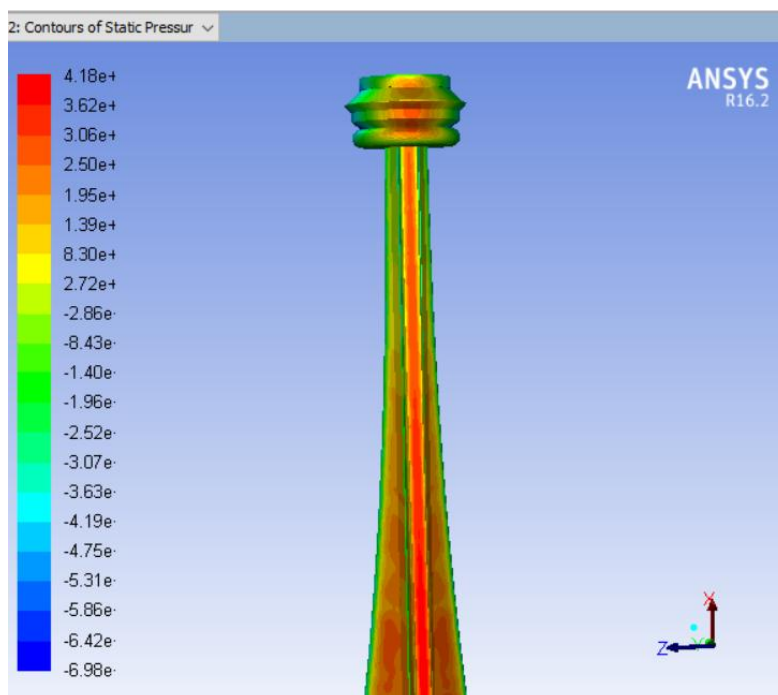


Figura 7.1.2.4.1.3. Distribució simètrica de pressions a banda i banda

Finalment si es fan talls a diverses alçades de la columna i del mirador s'observa que a més àrea de contacte, hi ha més pressió, cosa que concorda amb el que s'esperava (figura 7.1.2.4.1.3).

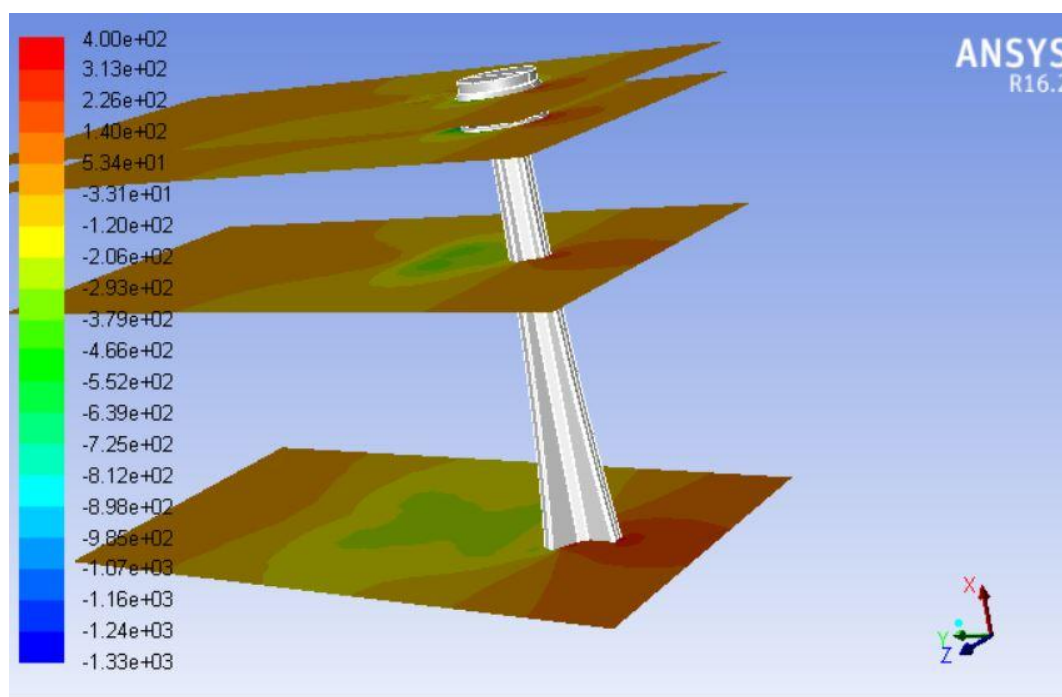


Figura 7.1.2.4.1.4. Talls a diferents alçades per veure la pressió

7.1.3. Simulació de les antenes

7.1.3.1. Geometria

Es procedeix de la mateixa manera que amb la simulació de la base, de tal forma que la caixa queda així (figura 7.1.3.1.1):

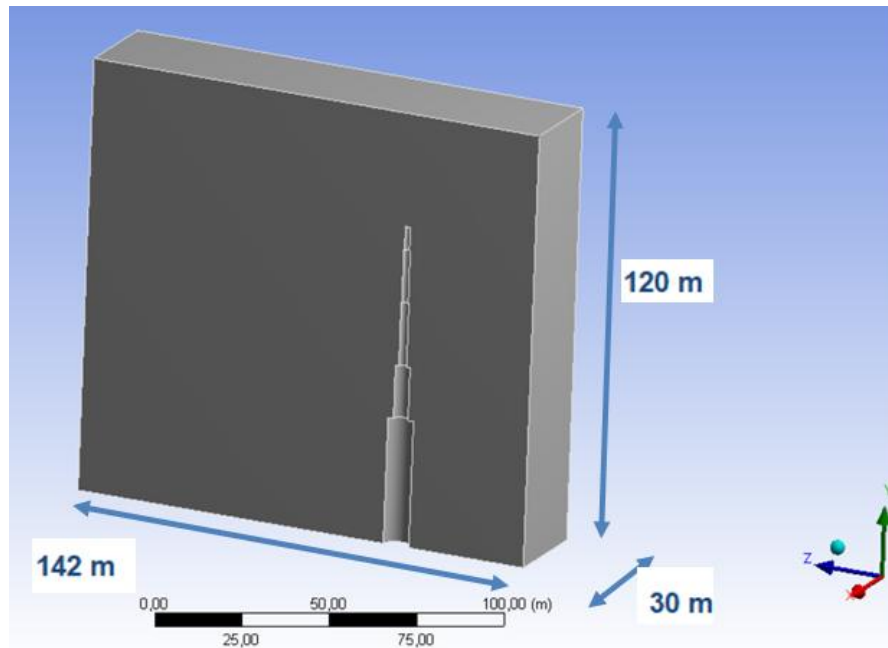


Figura 7.1.3.1.1. Mides de la caixa de fluid

7.1.3.2. Mallat

S'ha fet un mallat de les antenes amb un face sizing de mida 0,5 metres i un body sizing de 1,5 metres (figura 7.1.3.2.1). A la taula 7.1.3.2.1 hi ha el nombre d'elements i nodes obtinguts.

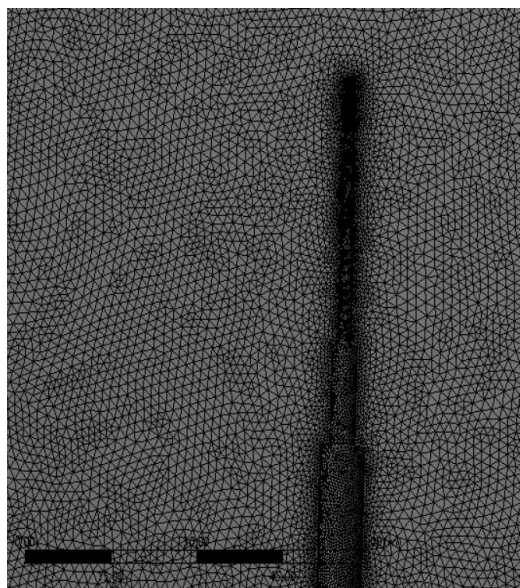


Figura 7.1.3.2.1. Malla de les antenes

Mida element	Núm.elements	Núm. nodes
Face sizing 0,5 i	1.547.563	274.222
Body Sizing 1,5 m		

Taula 7.1.3.2.1. Taula dels elements del mallat

7.1.3.3. Resultats

7.1.3.3.1 CD, residus i FD

Després de 300 iteracions el valor del cd ha donat 0,021 havent convergit molt (veure figura 7.1.3.3.1.1), mentre que els residus han donat valors molt baixos. (figura 7.1.3.3.2).

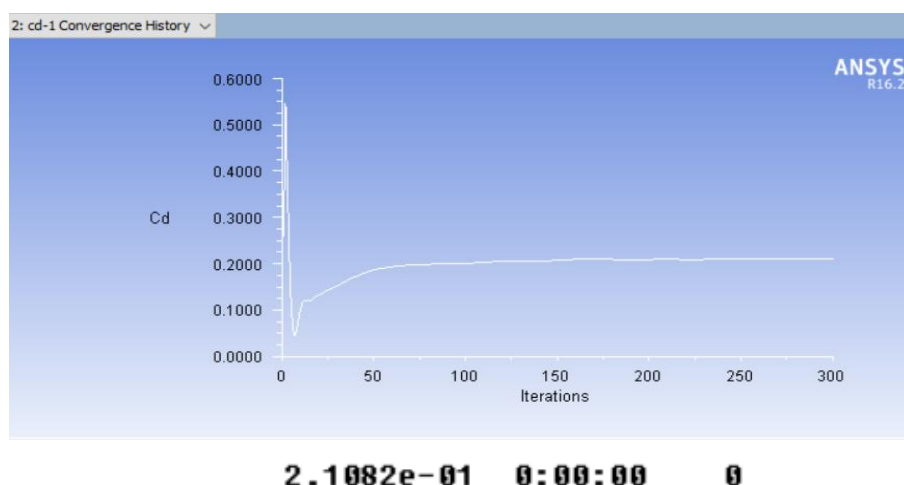


Figura 7.1.3.3.1.1. Gràfica de l'evolució del cd i valor últim

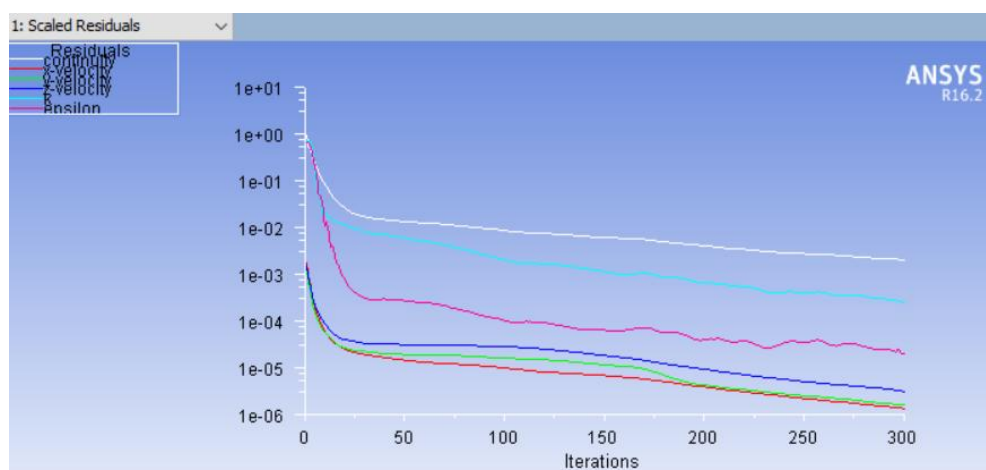


Figura 7.1.3.3.1.2. Gràfica dels residus de les equacions

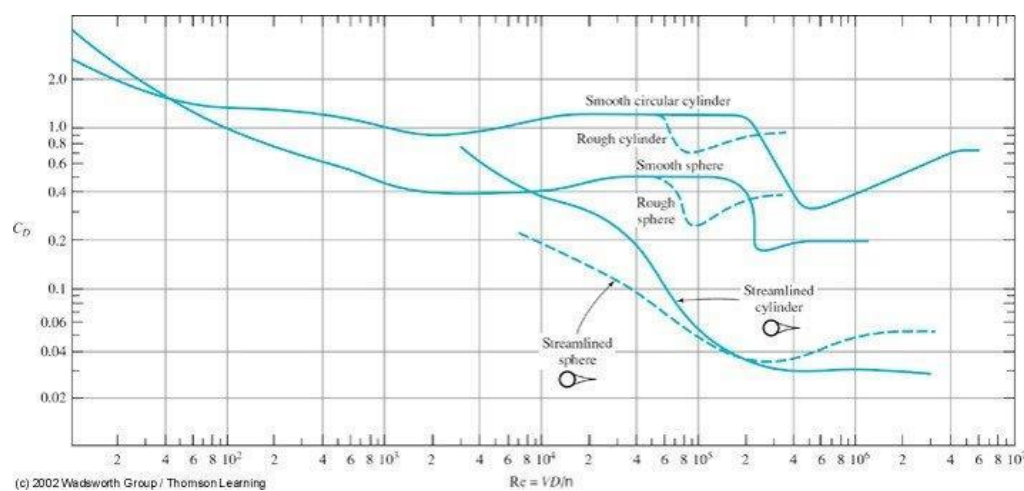


Figura 7.1.3.1.1.3. C_D d'un cilindre a diferents Re i rugositats

El valor del C_D concorda amb el d'un cilindre (figura 7.1.3.3.1.3)

La Força d'arrossegament o de drag es calcula de la següent manera (s'ha fet servir el segon valor de c_d) :

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot u_\infty^2 \cdot A_D = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,21 \cdot 20 \cdot 20 \cdot 260,88 = 13,42 \text{ kN}$$

7.1.3.3.2 Velocitats

L'aire flueix molt aerodinàmicament per l'antena, es comprova com els punts blaus (d'estancament) són molt petits i de seguida torna a agafar velocitat en topar amb la superfície cilíndrica i les esteles deixades són molt petites, pràcticament inexistents en la part superior (figura 7.1.3.3.2.1).

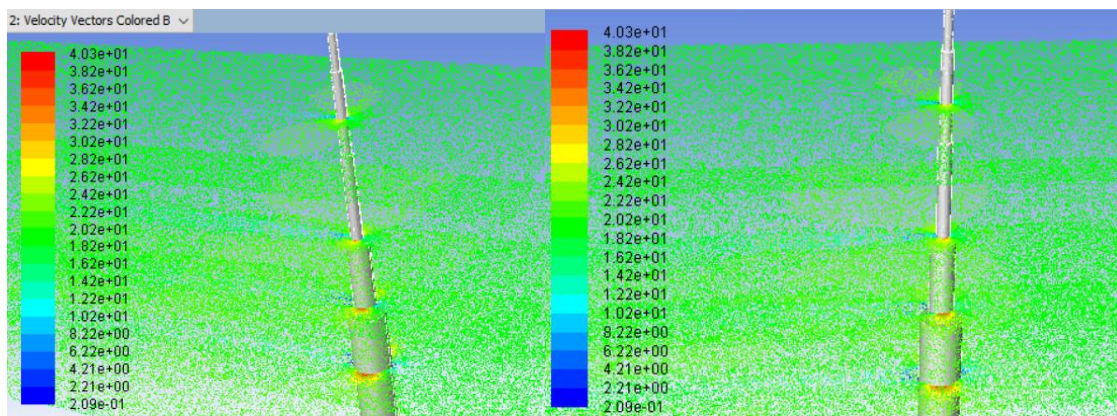


Figura 7.1.3.3.2.1. Vectors velocitat a l'antena

7.1.3.3.3 Pressions

Les pressions segueixen el mateix aspecte tota l'estona doncs es tracta de cilindres, l'única diferència és que a major àrea hi ha més pressió, i els colors de pressió gran es corresponen als punts de velocitat mínima (figura 7.1.3.3.3.1).

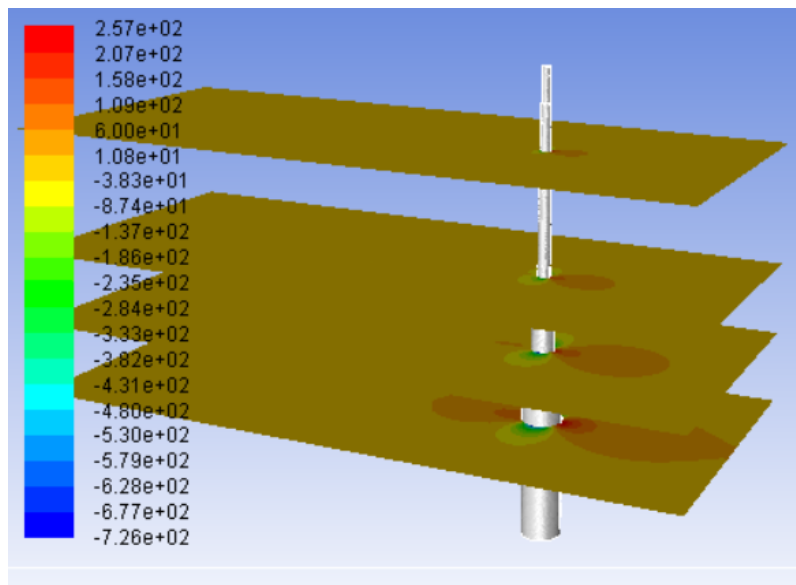


Figura 7.1.3.3.3.1 Pressions a diferents alçades de l'antena

Conclusions

Les conclusions d'aquests projecte són:

- S'ha pogut aprendre a treballar amb dos dels mòduls del software Ansys Workbench, el Modal, extensivament, i el Fluent.
- S'ha pogut comprovar com els models en solidworks són bones aproximacions de la realitat tenint en compte la falta de plànols totalment detallats, i que s'ha hagut de treballar a partir de fotografies, plànols d'alçat i planta amb poques cotes o cotes que s'havien d'extrapolar i representacions en 3d d'SketchUp. Una de les raons per les quals són prou bons és perquè efectivament alguns dels modes trobats computacionalment per alguns edificis coincidien amb els experimentals. D'altra banda, alguns dels altres no s'hi aproximaven, per tant, la geometria és el principal motiu de que no funcionés, i després, l'extrapolació dels materials, que no obstant, s'ha intentat acotar tenint en compte l'abast del projecte.
- Els modes propis de vibració d'una estructura es poden observar fàcilment mitjançant eines dins el Modal per poder veure l'estructura sense deformar al mateix temps que es veu la deformada del mode, i també gràcies a les escales.
- Un cop trobats aquests modes, és molt important que fenòmens d'excitació com són freqüències de despreniment de vòrtex o altres fenòmens dinàmics no coincideixin amb elles, sinó l'estructura entra en ressonància i es pot malmetre.
- Els modes de la torre de Toronto i de la SWFC s'assemblen més degut a que tenen una forma més esbelta que no pas l'hotel Vela.
- A l'hora de fer anàlisis amb Ansys cal preveure l'espai de disc i l'estona dependent del nombre d'elements i aplicar un mallat correcte. En general els anàlisis de sensibilitat de malla aplicats als anàlisis modals han estat força coherents, però per alguna freqüència alta no es podia assegurar la convergència.
- El càlcul de les freqüències de despreniment de vòrtex es pot trobar teòricament a través de taules sabent el Reynolds i la secció de l'edifici, però no s'han trobat taules amb Reynolds prou elevats. Una alternativa seria continuar estudiant la part aerodinàmica d'aquest projecte de forma dinàmica (transitoris) enlloc de l'estacionari; així es podria relacionar amb les freqüències trobades en el modal.

- De l'estudi aerodinàmic de la torre es pot concloure que és una estructura força aerodinàmica, degut a la part del mirador i les antenes, i no tant per la base, és a dir, com més amunt més aerodinàmica és. Això es correspon amb els edificis de formes cilíndriques o circulars (i no prismàtiques) que conformen, alhora, menys força d'arrossegament perquè el c_d serà més baix i, per tant, rebran menys càrrega horitzontal deguda al vent.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] <http://www.cntower.ca/en-ca/about-us/history/topping-of-tower.html>
- [2] <https://www.blogto.com/upload/2013/06/20130625-CN-Plan2-Alt.jpg>
- [3] <https://www.skyscraperpage.com>
- [4] http://4.bp.blogspot.com/-okCH7MQOawA/UCzZdS2jscl/AAAAAAAAACu0/DU6xYEQqd-0/s1600/CN_Tower_Turmkorb-Modell-blau.png
- [5] RICARDO BOFILL TALLER DE ARQUITECTURA, *Edifici Vela. Ricardo Bofill Taller d'Arquitectura*. Barcelona: Mediuscula, 2010. ISBN: 978-84-96928-06-0
- [6] <http://www.swfc-shanghai.com/about.php>
- [7] <http://1photo1day.com/wp-content/uploads/2017/09/The-Shanghai-World-Financial-Center-in-China-20170903.jpg>
- [8] http://www.thorntontomasetti.com/wp-content/uploads/2012/02/Super_Tall_Design.pdf
- [9] http://www.thorntontomasetti.com/wp-content/uploads/2012/02/Super_Tall_Design.pdf
- [10] https://www.thestar.com/news/gta/2014/02/23/cn_tower_built_to_last.html
- [11] https://fau.digital.flvc.org/islandora/object/fau%3A31260/datastream/OBJ/view/Wind_effect_on_super-tall_buildings_using_computational_fluid_dynamics_and_structural_dynamics.pdf
- [12] <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/902643/>
- [13] [\[http://studylib.es/doc/4484720/evoluci%C3%B3n-de-los-edificios-en-altura-despu%C3%A9s-del\]](http://studylib.es/doc/4484720/evoluci%C3%B3n-de-los-edificios-en-altura-despu%C3%A9s-del)
- [14] <https://www.slideshare.net/ManojKumar1800/structural-systems-and-aerodynamic-in-multi-story-buildings>
- [15] <https://www.google.com/url?hl=ca&q=https://urbantoronto.ca/forum/threads/70s-era-cn-tower-photos-wanted-inside-construction-antenna-signing-opening-day.18892/page->

4&source=gmail&ust=1516377607464000&usg=AFQjCNFPiISSpVX4PXE6Zb2fphhcyTvZwQ

[16] <http://www.documentalesgratis.es/desmontando-ciudad-discovery-max-toronto/>

[17] <https://www.youtube.com/watch?v=031QVwIBg3g> FC

[18] <https://www.youtube.com/watch?v=WY6h9bMvCyA>

[19] <http://www.webcivil.com/usrcrebar.aspx>

[20] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-A242-HSLA-Steel>

[21] <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bse-cr-001:1984:12::134>

[22] <http://www.ideam.es/wp-content/uploads/2017/03/La-estructura-del-Hotel-Vela.pdf>

[23] <http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/14-case-study-shanghai-world-financial-center.pdf>

[24] https://www.researchgate.net/publication/256968169_Modal_identification_of_Shanghai_World_Financial_Center_both_from_free_and_ambient_vibration_response

Bibliografia complementària

[1] EGUSQUIZA, E. *Comportament dinàmic de màquines hidràuliques*, Barcelona: Edicions UPC, 2003.

[2] IALANNE, M. *Mechanical vibration for engineers*. Belfast: John Wiley and Sons. ISBN: 0471901970

[3] BLEVINS, R. *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Malabar, Florida: Hrieger Publishing Company, 1984.

[4] BLEVINS, R. *Flow-induced vibration*. New York: Van Nostrand Renhold Company: 1977.

[5] <https://www.aps.org/publications/apsnews/201611/physicshistory.cfm>

[6] <https://www.slideshare.net/ManojKumar1800/structural-systems-and-aerodynamic-in-multi-stoery-buildings>

[7] <https://3dwarehouse.sketchup.com/?hl=en>

Annex

Plànols amb les cotes més significatives:

